



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNE PESONEN
RADAN EPÄTASAISUUKSIEN VAIKUTUS KALUSTON KOKEMIIN
VÄRÄHTELYIHIN

Diplomityö

Tarkastajat: TkT Pekka Salmenperä
ja DI Tiia-Riikka Lojonen
Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
nan tiedekuntaneuvoston kokouk-
sessa 9. syyskuuta 2015

TIIVISTELMÄ

ANNE PESONEN: Radan epätasaisuuksien vaikutus kaluston kokemiin värähtelyihin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 104 sivua

Helmikuu 2016

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: TkT Pekka Salmenperä, DI Tiia-Riikka Lopenen

Avainsanat: radan epätasaisuudet, junakaluston värähtely, ominaisvärähtely, junakaluston kiihtyvyydet

Tässä työssä perehdytään radassa esiintyviin erilaisiin epätasaisuuksiin ja niiden syntymiseen. Työn tarkoituksena on tutkia erilaisten epätasaisuuksien sekä epätasaisuuksien aallonpituuksien aiheuttamia kiihtyvyyksiä kaksikerroksisessa matkustajavaunussa mallinnusta apuna käyttäen.

Radan merkittävät geometriavirheet johtuvat usein radan jäykkyysvaihteluista sekä radan rakennekerroksen ja pohjamaan painumisesta. Kiskossa esiintyvän epätasaisuuden aallonpituus on usein huomattavasti pienempi kuin radan alempien kerroksien painumisesta aiheutuvien epätasaisuuksien aallonpituus. Matkustajavaunun kiihtyvyyksien tarkastelua varten valittiin kolme erilaista poikkeamaa: kierous, korkeuspoikkeama ja nuolikorkeuspoikkeama, joille oli määritelty Liikenneviraston kunnossapitoraportissa raja-arvot kunnossapitoluokan mukaan. Tarkasteltaviksi kunnossapitoluokiksi valittiin D ja *, sekä näitä huonompaa tilannetta kuvaava kuvitteellinen H-luokka. Geometriavirheen aallonpituudeksi oli määritelty nuolikorkeuspoikkeamalle 20 m, kieroudelle 3,5 m ja korkeuspoikkeamalle 5 m.

Kaksikerroksiselle vaunulle aiheutuvia kiihtyvyyksiä tutkittiin monikappaledynamiikkaan perustuvan mallin avulla. Mallin toimivuutta tarkasteltiin ominaismuotoanalyysin avulla, jossa mallista saatuja ominaisvärähtelyn arvoja verrattiin todellisista mittauksista saatuihin värähtelyn arvoihin. Kalustosimuloinneissa erityisen ongelmalliseksi geometriavirheeksi huomattiin korkeuspoikkeamat, joissa pystysuuntaisten kiihtyvyyksien raja-arvojen ylityksiä tapahtui kaikissa mallinnetuissa luokissa. Myös kierouden aiheuttamissa pystysuuntaisissa kiihtyvyyksissä raja-arvot ylittyivät D- ja H-luokassa. Nuolikorkeuspoikkeaman aiheuttamat kiihtyvyydet eivät ylittäneet raja-arvoja, sillä mallinnuksessa käytetty nuolikorkeuspoikkeaman geometriavirhe noudatteli sinikäyrää. Todellisuudessa muodoltaan sinikäyrää terävämpi poikkeama voisi aiheuttaa raja-arvojen ylityksiä.

Kierouden aallonpituudelle käytetään kunnossapitoluokituksessa 3,5 m aallonpituutta, mutta aallonpituuden kasvaessa kierouden aiheuttamat kiihtyvyydet voivat jopa kasvaa. Tarkastelluista simulointitapauksista kierouden aiheuttamat kiihtyvyydet ovat suurimmillaan 10 m aallonpituudella ja erityisesti kaksikerroksisen vaunun toisessa kerroksessa. Aallonpituuden kasvaessa 40 m asti vaunun toisen kerroksen poikittaissuuntainen siirtymä vaikuttaisi kasvavan myös lineaarisesti, vaikka kiihtyvyys pieneneekin. Pidemmän aallonpituuden kierous saatetaankin siis kokea vaunun toisessa kerroksessa laivamaisena keinuntana.

ABSTRACT

ANNE PESONEN: The Effect of Rail Irregularities on Accelerations of Rolling Stock

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 104 pages

February 2016

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Pääaine: Civil Engineering

Examiner: D. Sc. Pekka Salmenperä, M. Sc. Tiia-Riikka Lopenen

Keywords: rail irregularity, vibration of rolling stock, natural vibration, accelerations of rolling stock

This Master's thesis focuses on different rail irregularities and their development. The aim of this thesis is to study the accelerations of a double deck passenger coach caused by different irregularities with varying wavelengths.

The vertical stiffness of rail and displacements of superstructure and substructure are often the reasons for significant track irregularities. The wavelength in rail irregularities is often shorter than the wavelength in irregularities caused by superstructure. The accelerations of a double deck passenger coach was examined with three irregularities: track gradient deviation, versed sine deviation and track twist. Finnish Transport Agency has defined limit values for these irregularities by maintenance categories in a maintenance report. In this thesis categories D and * are used in addition to fictional H-category, which represents a worse imaginary scenario of irregularities.

The accelerations of a double deck passenger coach were examined with a dynamic model built with Vampire Pro. Modeled natural vibrations were compared with measurements done in a real double deck passenger coach. The simulations indicate that track gradient deviations can cause high accelerations, which exceed the limiting values in all maintenance categories given by Finnish Transport Agency. Track twist also causes accelerations that exceed the limiting values in categories D and H. Acceleration limits were not exceeded with versed sine deviation, because the modeled irregularity followed a sine wave. In reality, an angular shaped irregularity could cause higher accelerations than observed, since rolling stock may not be able to adapt quickly enough with the irregularity.

The wavelength used for track twist is 3.5 meters as given in the maintenance report. If a longer wavelength is used, it could further increase the accelerations of the coach. In the model the highest accelerations appeared when a 10 m wavelength was used. At this wavelength, the coach was vibrating in a lower centre rolling -eigenmode causing higher accelerations in the second than in the first deck of the passenger coach. When wavelength was increased to 40 m the lateral displacement increased linearly, even though the accelerations decreased. Track twist with a long wavelength can cause slow swaying of the coach.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksella maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ on tehty osana Liikenneviraston rahoittamaa Elinkaaritehokas Rata (TERA) -tutkimushanketta.

Erityiskiitokset haluan osoittaa työn tarkastajille diplomi-insinööri Tiia-Riikka Laposelle ja tekniikan tohtori Pekka Salmenperälle työn aikana saamistani loistavista neuvoista sekä työni tarkastamisesta. Kiitokset myös Juha Miettiselle mittauksien suorittamisesta ja mitaustulosten tulkinnan avustamisessa, sekä Vampire Pro:n tekniselle tuelle heiltä saamistani neuvoista mallin rakentamisessa. Haluan lausua kiitokseni myös työn alkuun saattamisesta professori Antti Nurmikolulle, sekä koko maa- ja pohjarakenteiden yksikön työporukkaa innostavan työilmapiirin luomisesta. Haluan kiittää myös Transtechia ja työn tilaajana toiminutta Liikennevirastoa mielenkiintoisen työn tekemisen mahdollistamisesta.

Suurimmat kiitokseni myös Vilelle työn teon ja opiskelujen aikana osoitetusta tuesta ja kärsivällisyydestä. Kiitokseni myös perheelleni ja ystäville loputtomasta kannustuksesta.

Tampereella, 31.12.2015

Anne Pesonen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | RADAN EPÄTASAISUUDET | 3 |
| 2.1 | Kaluston kiihtyvyyksiin vaikuttava radan geometria..... | 3 |
| 2.1.1 | Pystygeometria..... | 3 |
| 2.1.2 | Raideleveys | 6 |
| 2.1.3 | Kaarteet | 7 |
| 2.1.4 | Nuolikorkeus | 8 |
| 2.1.5 | Kallistus | 10 |
| 2.2 | Kunnossapitoluokitus | 12 |
| 3. | EPÄTASAISUUKSIEN SYNTY JA SYYT | 15 |
| 3.1 | Kuormituksien välittyminen ratarakenteessa | 15 |
| 3.2 | Kiskolle aiheutuvat kuormitukset..... | 18 |
| 3.3 | Kiskoviat | 20 |
| 3.4 | Radan epätasaisuuksien mittausmenetelmät | 23 |
| 4. | JÄYKKYYSVAIHTELU | 25 |
| 4.1 | Ratamoduuli ja radan jäykkyys | 25 |
| 4.2 | Staatinen ja dynaaminen jäykkyys | 25 |
| 4.3 | Radan rakenneosien jäykkyys | 27 |
| 4.4 | Jäykkyysvaihtelun seuraukset | 35 |
| 4.5 | Radan jäykkyyserojen mittausmenetelmät..... | 38 |
| 5. | RADAN EPÄTASAISUUKSIEN VAIKUTUS KALUSTON KOKEMIIN KUORMITUKSIIN | 40 |
| 5.1 | Kaluston ja radan vuorovaikutus | 40 |
| 5.1.1 | Akselipaino ja pyöräkuorma | 40 |
| 5.1.2 | Pyörän ja kiskon vuorovaikutus | 41 |
| 5.1.3 | Pyöräviat | 43 |
| 5.2 | Kaluston osat | 44 |
| 5.2.1 | Teli | 44 |
| 5.2.2 | Jousitus ja vaimennus..... | 46 |
| 5.2.3 | Pyöräkerta ja sen kiinnitys | 48 |
| 5.2.4 | Idän liikenne..... | 49 |
| 5.3 | Kalustoon yleisesti vaikuttavat voimat | 50 |
| 5.3.1 | Vastusvoimat..... | 50 |
| 5.3.2 | Värähtely | 51 |
| 5.3.3 | Junakaluston värähtelykäyttäytyminen | 52 |
| 5.4 | Epätasaisuuksien aiheuttama värähtely | 54 |
| 5.4.1 | Eritaajuiset värähtelyt | 54 |
| 5.4.2 | Voimien vaikutus turvallisuuteen | 56 |
| 5.4.3 | Kiihtyvyyksien raja-arvot | 57 |
| 6. | KALUSTOMALLINNUS | 58 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.1 | Kaksikerroksinen IC-vaunu..... | 58 |
| 6.2 | Mallin rakentaminen | 60 |
| 7. | KALUSTOMALLIN OMINAISMUOTOANALYYSI | 64 |
| 7.1 | Analyysin pohjana käytetyt mittaukset | 64 |
| 7.2 | Mittausten tulokset | 65 |
| 7.3 | Ominaisvärähtely mallissa | 66 |
| 8. | SIMULOINTI | 69 |
| 8.1 | Eri simulointitapausten esittely | 69 |
| 8.2 | Tulokset..... | 71 |
| 8.2.1 | Nuolikorkeuspoikkeama | 72 |
| 8.2.2 | Korkeuspoikkeama..... | 75 |
| 8.2.3 | Kierous | 80 |
| 8.2.4 | Jäykkyysvaihtelu | 85 |
| 8.2.5 | Epätasaisuuksien eri aallonpituudet | 87 |
| 9. | YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT | 96 |
| 9.1 | Kalustomallin rakennus ja ominaismuotoanalyysi..... | 96 |
| 9.2 | Radan epätasaisuudet ja niiden simulointi | 96 |
| 9.3 | Simulointitulokset | 97 |
| 9.4 | Jatkotutkimus | 99 |
| | LÄHTEET..... | 100 |

1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia mallinnuksen avulla erilaisten epätasaisuuksien vaikutusta kaksikerroksisen vaunun kulkuun. Kaksikerroksinen vaunu poikkeaa merkittävästi radalla liikkuvasta muusta kalustosta kaksikerroksisuutensa takia ja saattaa näin ollen saada muista vaunuista poikkeavia kiihtyvyyksiä. Toisen kerroksen matkustajat ovat kokeneet satunnaisesti laivamaista keinuntaa ja heilahduksia, mikä heikentää matkustusmukavuutta.

Mallinnuksen avulla voidaan tehokkaasti tutkia erilaisten kalustotyyppien käyttäytymistä halutunlaisissa olosuhteissa, jolloin tuloksia saadaan nopeammin ja edullisemmin kuin mittauksia suorittamalla. Mallin avulla simuloinneissa voidaan tarkastella vaunun eri osien kiihtyvyyksiä sekä siirtymiä. Vertaamalla saatuja kiihtyvyyksiä asetettuihin kiihtyvyyksien raja-arvoihin voidaan nähdä, saako kaksikerroksinen vaunu joillain hyväksytyillä epätasaisuuksilla liian suuria kiihtyvyyksien arvoja. Vertailun onnistumiseksi kalustomallin tulee vastata riittävällä tarkkuudella oikean kaluston käyttäytymistä, mitä voidaan varmentaa kalustomallin verifiointilla. Verifiointissa mallin saatuja ominaismuotojen taajuuksien arvoja vertaillaan mittauksissa saatujen vaunun todellisten taajuuksien arvoihin ja malliin tehdään tämän perusteella tarvittavia korjauksia. Tämän työn puitteissa varsinaista verifiointia ei tehty, vaikka simulointituloksia vertailtiin mitattuihin tuloksiin.

Työ tehdään Tampereen teknillisessä yliopistossa osana Liikenneviraston tilaamaa työtä ”Liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutus; Monikappaledynamiikkaan perustuvien kalustomallien verifiointi”. Ennen mallinnusta tarkastellaan radan geometriaa ja sen erilaisia poikkeamia. Geometrian poikkeamiin perehdytään kirjallisuusselvityksellä epätasaisuuden synnystä ja radan jäykkyyden vaihtelun vaikutuksesta radan geometriavirheiden syntyyn. Vaunun kiihtyvyyksiä tutkitaan rakentamalla Vampire Pro ohjelmalla monikappaledynamiikkaan perustuva malli kaksikerroksisesta IC-vaunusta (Ed-vaunu). Samalla ohjelmalla on rakennettu jo onnistuneesti toimiva malli yksikerroksisesta IC-vaunusta (Ex-vaunu). (Heinonen 2012)

Luvussa 2 tarkastellaan radan geometrian piirteitä sekä geometriassa esiintyviä erilaisia poikkeamia sekä niiden raja-arvoja. Sen jälkeen esitellään radan geometrialle asetetut raja-arvot ja kunnossapitoluokitukset, mitkä ovat pohjana myöhemmin eri simulointitapauksia valittaessa. Luvussa 3 käsitellään epätasaisuuksien syntymistä, eli miten kuormitukset välittyvät ratarakenteissa ja muodostavat epätasaisuuksia. Luvussa 4 käsitellään radan jäykkyysvaihteluita ja mistä radan jäykkyys muodostuu. Syvemmin perehdytään radan jäykkyysvaihtelun seurauksiin radan rakenteen ja epätasaisuuden kannalta ja miten

radan jäykkyyttä voi mitata. Luvussa 5 tarkastellaan radan ja kaluston vuorovaikutusta, eli millaisia kuormituksia kalusto aiheuttaa radalle ja epätasainen rata kalustolle.

Luvussa 6 tarkastellaan lähemmin kaksikerroksiselle vaunulle rakennettavaa mallia. Luvussa on esitetty kaksikerroksinen vaunu ja mallinnuksessa käytetyt parametrit. Luvussa 7 perehdytään kalustomallin verifiointiin, eli suoritettuihin mittauksiin, niistä saatuihin tuloksiin sekä mittaus- ja mallinnustulosten vertailuun. Luvussa 8 esitellään mallille suoritettavat simulointiajot ja niistä saadut tulokset ja päätelmät ja luvussa 9 esitellään päätuloksien yhteenveto sekä jatkotutkimusehdotukset.

2. RADAN EPÄTASAISUUDET

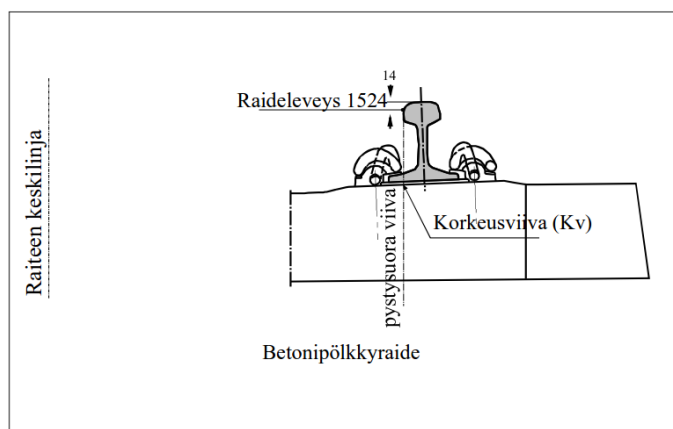
Kaluston kiihtyvyydet johtuvat usein radan geometrian muuttumisesta esimerkiksi kaarteissa sekä radan erilaisista epätasaisuuksista. Radan geometrian kuvaamista varten on määritetty tietyt termit, joilla ilmennetään radan geometriaa sekä sen muutoksia. Radan geometrian poikkeamia kuvataan usein näiden termien avulla. Geometrialle ja sen poikkeamille määritellyt raja-arvot toimivat apukeinona radan epätasaisuuksien sekä niiden aiheuttamien haittojen ja kunnossapitotarpeiden määrittelylle. Radan geometrian ja sen poikkeamien ymmärtäminen auttaa myös radalla esiintyvien kaluston värähtelyjen ymmärtämisessä.

2.1 Kaluston kiihtyvyyksiin vaikuttava radan geometria

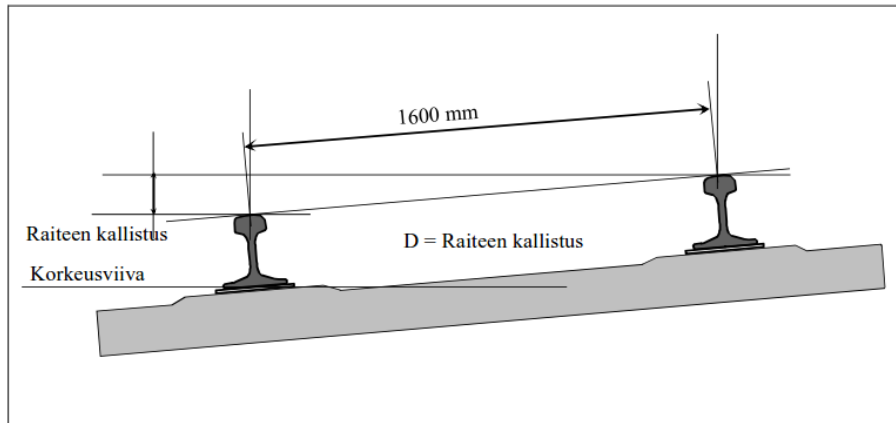
Radan geometrian perusteiden ja termien ymmärtäminen on tärkeää radan geometrian poikkeamien ymmärtämisen kannalta. Tässä luvussa on käsitelty radan geometrian suuria ja niihin liittyviä termejä. Myös eri geometrian poikkeamat esitellään tässä luvussa.

2.1.1 Pystygeometria

Pystygeometrian suure kuvaa raiteen sijaintia korkeussuunnassa, joka määritellään korkeusviivan taitepisteiden avulla. Korkeusviiva määrittelee raiteen korkeuden kiskon kulkureunan kohdalta aluslevyn tai välilevyn alapinnan tasossa. Suoralla ja kallistamattomassa kaarteissa korkeusviiva määritetään toisen kiskon kulkureunan kohdalla (kuva 1) ja kallistetuissa kaarteissa korkeusviiva määritellään sisäkiskon kulkureunan kohdalla (kuva 2). Raiteen korkeusviiva muodostuu pelkästään suorista kaltevuusjaksoista ja ympyräkaaren muotoisista pyöristyskaarista. Pystygeometriassa ei käytetä siirtymäkaaria. (Liikennevirasto 2010)

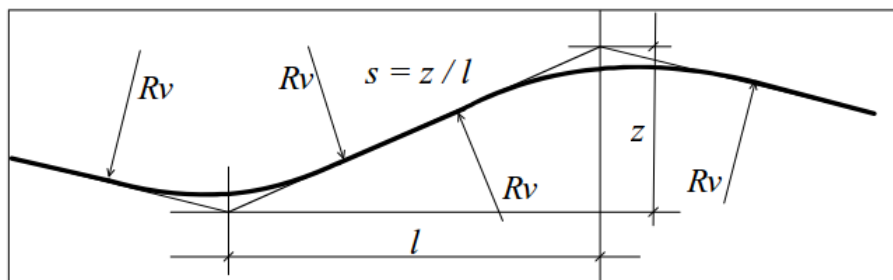


Kuva 1. Radan korkeusviiva kallistamattomassa betoniratapölkkyraiteessa. (Liikennevirasto 2010)



Kuva 2. Raiteen kallistus sekä radan korkeusviiva kallistetussa raiteessa. (Liikennevirasto 2010)

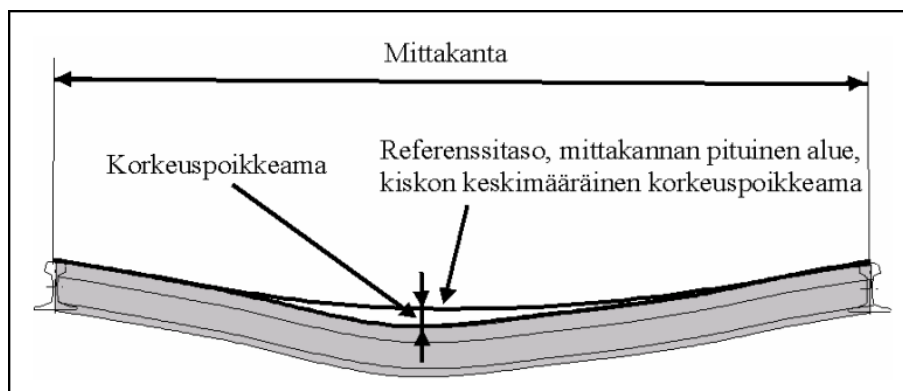
Raiteen pituuskaltevuus kuvaa pituuskaltevuuden suhdetta vaakatasoon nähden. Radan pituuskaltevuus s määritetään korkeuseron z ja vaakapituuden l suhteella, $s = \frac{z}{l}$ (kuva 3). Pituuskaltevuuden yksikkönä käytetään desimaalilukua (0,0040) tai promillea (4,0 ‰) eli tuhannesosalukua. Jos pituuskaltevuuksia kuvattaessa käytetään etumerkkejä, merkitään negatiivisella arvolla (-) alamäkeä pituusmittauksen kasvusuuntaan. Raiteen korkeusviiva pyöristetään aina taitepisteen kohdalla pyöristyskaarresäteellä R_v . (Liikennevirasto 2010; Taimela 2011)



Kuva 3. Raiteen pituuskaltevuus ja määrittävät suuret. (Liikennevirasto 2010)

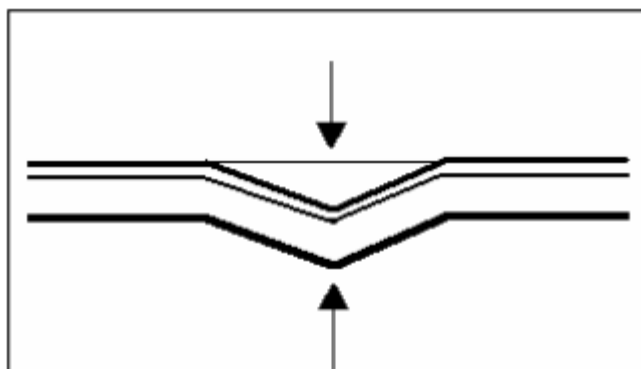
Korkeusviiva voidaan myös määrittää usealle raiteelle yhteisesti, kuten esimerkiksi rata-pihoilla tai useampiraiteisilla radoilla. Korkeus määritellään silloin yhdelle raiteelle, jolloin muut saavat saman korkeusviivatason. Tällöin korkeusviiva on vaakasuorassa poikkileikkauksessa kaikilla radoilla sama, mutta pituuskaltevuus voi poiketa muista raiteista jos poikkileikkausten välinen matka on erilainen. (Taimela 2011)

Korkeuspoikkeaman mittaamiseen on kaksi erilaista määritelmää suomenkielisissä lähteissä. Ratateknisten määräysten ja ohjeiden osan 13 mukaan korkeuspoikkeama voidaan määrittää mittauksista, jolloin korkeuspoikkeama eroaa mittakannan muodostamasta referenssitasosta (kuva 4), joka määritetään usealla peräkkäisellä mittauksella. Referenssitaso on kiskon suuntainen, eli se voi olla vaakasuora tai kallistettu. Korkeuspoikkeama on siis poikkeama raiteen keskimääräisestä korkeustasosta. (Ratahallintokeskus 2006)



Kuva 4. Kiskon korkeuspoikkeama suhteessa referenssitasoon. (Ratahallintokeskus 2006)

Entisen ratahallintokeskuksen julkaisun ”Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta” (Ratahallintokeskus 2005a) mukaan korkeuspoikkeama määritetään kiskon kulkupinnan teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyydellä kiskon todellisesta kulkupinnasta, kuten kuvasta 5 ilmenee. Tässä tapauksessa jänteellä voidaan tarkoittaa minkä pituista mittakantaa tahansa, jolloin poikkeama on jänteen keskikohdan kohtisuora etäisyys kiskon todelliseen kulkupintaan. (Peltokangas & Nurmikolu 2015)



Kuva 5. Kiskon korkeuspoikkeaman määrittäminen. (Ratahallintokeskus 2005a)

Standardin 13848-1 mukaan pystysuuntainen poikkeama kiskossa määritellään vaakatasoon eli referenssitason mukaan. Referenssitasona toimii kiskon keskimääräinen asema. Määritelmä on hyvin samankaltainen kuin kuvan 4 tilanne. (SFS-EN 2008)

Taulukossa 1 on esitetty korkeuspoikkeamalle laadittuja raja-arvoja kunnossapitotasojen ja virheluokkien mukaan. Kaikki mitat ovat poikkeamia perusviivasta ja ne on esitetty millimetreinä. Esitetty mittakanta tarkoittaa radanpituutta, jonka alueelta mitattuna esitetty poikkeama saa tapahtua. (Ratahallintokeskus 2005a)

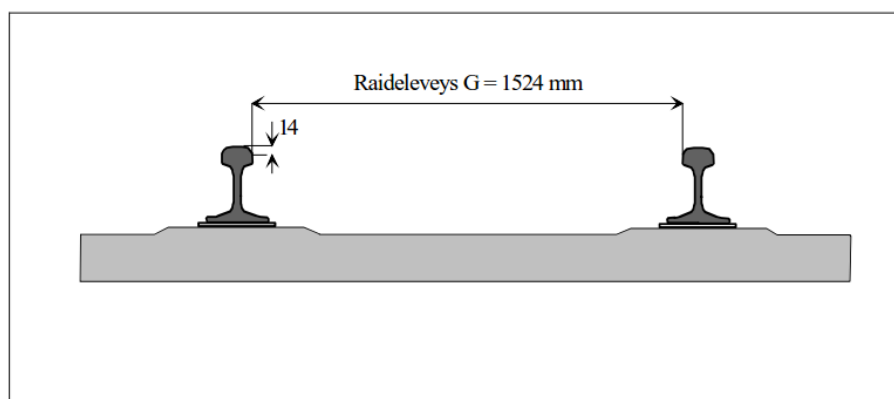
Taulukko 1. Korkeuspoikkeamille asetetut raja-arvot [mm], tulostuskanta 5 m. C-luokan virhe vaatii seurantaa, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| korkeuspoikkeamien (KPO, KPV) raja-arvot | | | | | | | | |
|--|------------------|----|---|---|----|----|----|----|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| D | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| * | 7 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 13 | 14 |

Korkeuspoikkeamat mitataan 12 metrin mittakannalla, mutta ne muutetaan ja tulostetaan 5 metrin mittakannalle. Mittakantojen keinoitekoinen pienennys aiheuttaa lievää poikkeamaa alkuperäisen tuloksen arvoon. Tarvittaessa myös 12, 35 ja 70 metrin mittakannoille tulostus on mahdollista. Korkeuspoikkeamat mitataan kummallekin kiskolle erikseen, oikealle (KPO) ja vasemmalle (KPV). (Ratahallintokeskus 2005a)

2.1.2 Raideleveys

Raideleveys on lyhyin etäisyys kiskojen kulkureunojen välillä 14mm kiskon selän alapuolelta (kuva 6). Suomessa raideleveyden nimellismitta on 1524 mm, mutta käytössä olevilla radoilla leveys saattaa vaihdella. Raiteen keskilinja määritetään vaakatasossa raideleveyden keskikohdaksi, jolloin kumpaankin kiskon kulkureunaan on yhtä pitkä matka. (Liikennevirasto 2010; SFS-EN 2008)



Kuva 6. Raideleveys ja sen mittauskohta. (Liikennevirasto 2010)

Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty raideleveyden levenemiselle ja kaventumiselle laadittuja raja-arvoja kunnossapitotasojen ja virheluokkien mukaan. Kaikki mitat ovat poikkeamia perusviivasta ja ne on esitetty millimetreinä. (Ratahallintokeskus 2005a)

Taulukko 2. Raideleveyden levenemiselle asetetut raja-arvot [mm]. C-luokan virhe vaatii seuranta, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Raideleveyden levenemisen (RL) raja-arvot | | | | | | | | |
|---|------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 3 | 3 | 8 | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| D | 5 | 5 | 14 | 16 | 18 | 20 | 20 | 20 |
| * | 15 | 15 | 25 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |

Taulukko 3. Raideleveyden kapenemiselle asetetut raja-arvot [mm]. C-luokan virhe vaatii seuranta, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Raideleveyden kapenemisen (RLK) raja-arvot | | | | | | | | |
|--|------------------|----|---|----|----|----|----|----|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| D | 4 | 4 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| * | 6 | 6 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

Raideleveydelle on määritelty erilliset raja-arvot raideleveyden kapenemiselle ja levenemiselle. Raideleveyden leveneminen ei haittaa kaluston kulkua yhtä helposti kuin kapeeneminen, joten sen raja-arvot ovat suuremmat.

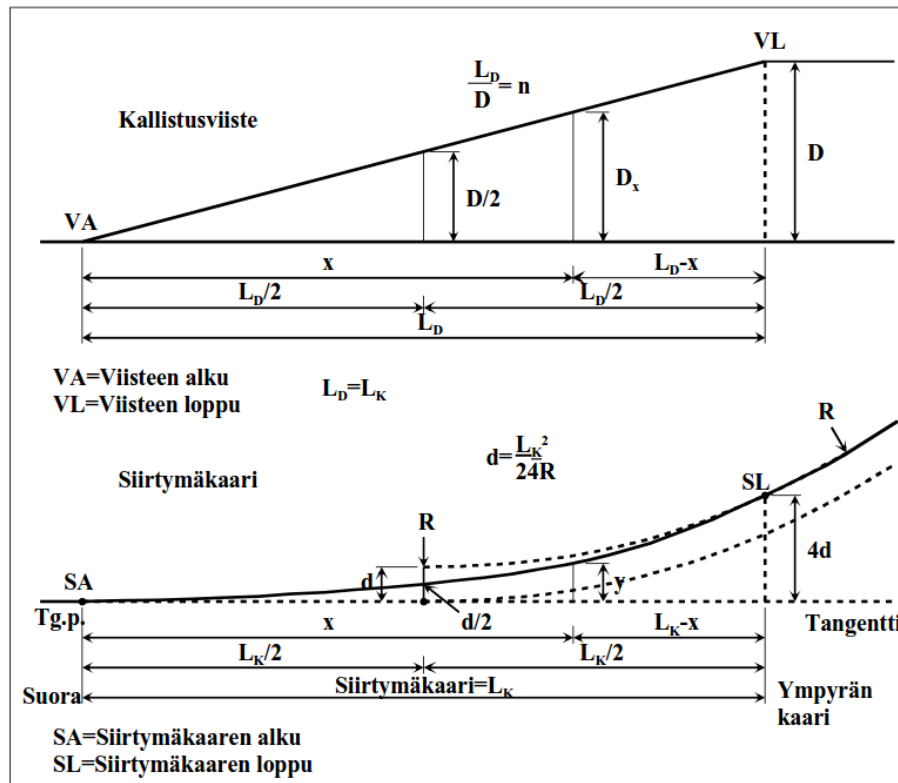
2.1.3 Kaarteet

Vaakageometrian elementteihin kuuluvat suorat, siirtymäkaaret, ympyränkaaret ja vaihteet. Tässä osiossa käsitellään siirtymäkaaria ja ympyräkaaria, sekä niihin liittyviä termejä. Radan kaarteet muodostuvat pääasiassa ympyränkaarista sekä niihin liittyneistä siirtymäkaarista. (Liikennevirasto 2010)

Kaarella tarkoitetaan vaakatasossa olevan ympyrän kaarta, jonka säde määritellään raiteen keskilinjän mukaan. Ympyränkaari ja siirtymäkaari muodostavat yhdessä kaarteiden perusrakenteen. Kaarre voi myös muodostua pelkästään ympyränkaaresta tai useammasta ympyränkaaresta sekä siirtymäkaarista, jolloin siitä muodostuu korikaari. Eri suuntiin kääntyvät kaarteet eivät ole enää samaa kaarretta, vaikka voivatkin muodostaa yhden kokonaisuuden. (Liikennevirasto 2010)

Siirtymäkaarta käytetään sujuvaan siirtymiseen suoran ja ympyräkaaren välillä. Näin ollessa siirtymäkaaren kaarevuus on muuttuva alkaen suoran kaarevuudesta ja päättyen halutun kaarteiden kaarevuuteen (kuva 7). Siirtymäkaaria käytetään paitsi suoran ja ympyräkaaren välissä, myös eri kaarteiden välillä. Siirtymäkaarta käytettäessä matkustuskokemus paranee ja raiteeseen kohdistuvat voimat pienenevät, kun kaarevuuden muutos tapahtuu pidemmällä matkalla. Myös kallistuksen vajoitus ja tämän myötä junaan kohdistuva

poikittaishiihtyvyyden muuttuu tasaisemmin välttämällä äkillisen poikittaishiihtyvyyden muutoksen (Liikennevirasto 2010; Taimela 2011)

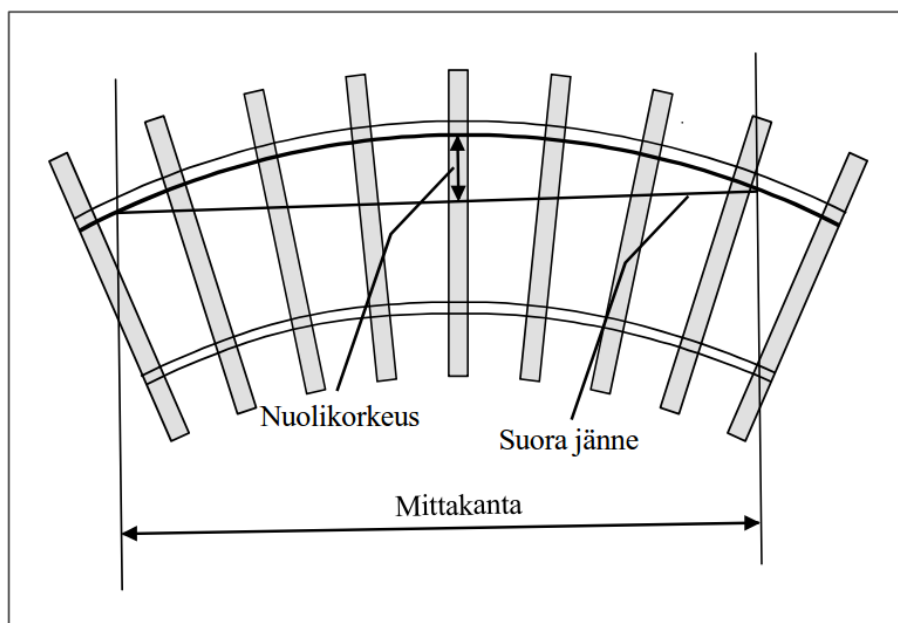


Kuva 7. Siirtymäkaari ja suora kallistusviiste. (Taimela 2011)

Siirtymäkaarena käytetään pääsääntöisesti klotoidia, jossa kaarevuus muuttuu tasaisesti koko matkalla. Yleensä siirtymäkaarena käytetään vain klotoidin alkuosaa, vaikka korikaarien välisinäsiirtymäkaarina käytetään klotoidin muitakin osia. Siirtymäkaarina voidaan käyttää myös muita erilaisia matemaattisia käyriä, kuten kolmannen asteen käyrää, neljännen asteen käyrää, sinikäyrää jne. Suomessa on kuitenkin käytössä pääsääntöisesti klotoidi, koska sen kaarevuuden lineaarinen muutos matkan suhteen sopii erityisen hyvin siirtymäkaariin. Kolmannen ja neljännen asteen käyriä käytetään erittäin harvoin. (Liikennevirasto 2010; Taimela 2011)

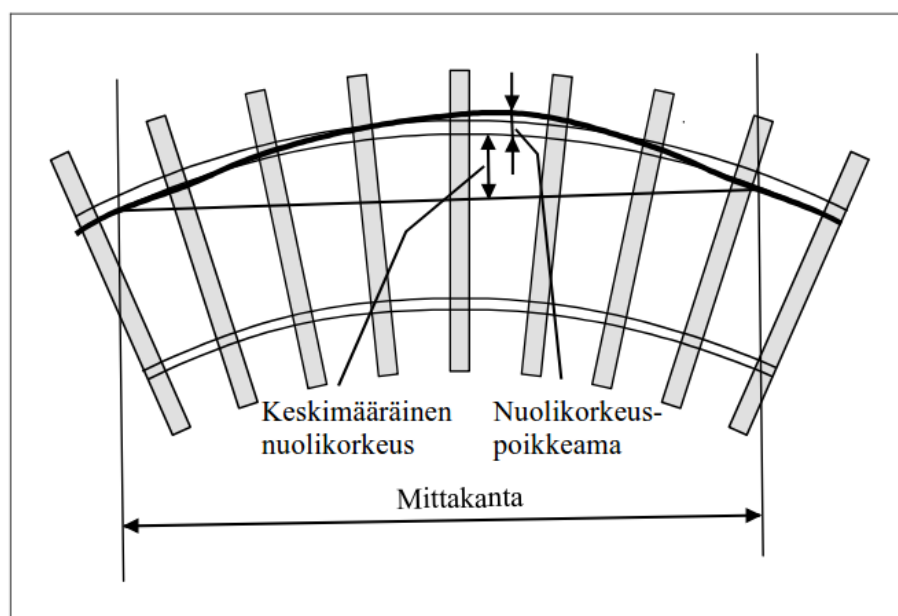
2.1.4 Nuolikorkeus

Nuolikorkeus on kiskon suurin sivupoikkeama, eli se kuvaa kiskon kaarevuutta. Nuolikorkeus voidaan mitata suoralla mittakannalla, jonka poikkeama on nuolikorkeuden arvo (kuva 8). Jos ollaan säännöllisellä ympyränkaarella, nuolikorkeuden maksimi-arvo voidaan määrittää jänteen keskikohdalta. Suoralla ollessa nuolikorkeuden arvoksi saadaan nolla, sillä kisko on silloin jänteen suuntainen. (Ratahallintokeskus 2006)



Kuva 8. Nuolikorkeus. (Ratahallintokeskus 2006)

Nuolikorkeutta voidaan mitata mittausvaunulla. Nuolikorkeuden poikkeamaa kutsutaan nuolikorkeuspoikkeamaksi, mikä kuvaa kiskon poikkisuuntaista poikkeamaa keskimääräisestä nuolikorkeudesta (kuva 9). Nuolikorkeuspoikkeama voidaan siis mitata samalla tavalla kuin nuolikorkeuskin. Keskimääräinen nuolikorkeus mitataan peräkkäisistä mitauksista. (Ratahallintokeskus 2005a)



Kuva 9. Nuolikorkeuspoikkeama. (Ratahallintokeskus 2006)

Taulukossa 4 on esitetty nuolikorkeuspoikkeamalle laadittuja raja-arvoja kunnossapitotasojen ja virheluokkien mukaan. Kaikki mitat ovat poikkeamia perusviivasta ja ne on

esitetty millimetreinä. Nuolikorkeuspoikkeaman raja-arvon määrittämisessä käytetty mittakanta on 20 metriä. Esitetty mittakanta tarkoittaa radan pituutta, jonka alueelta mitattuna esitetty poikkeama saa tapahtua. (Ratahallintokeskus 2005a)

Taulukko 4. Nuolikorkeudelle asetetut raja-arvot [mm]. C-luokan virhe vaatii seuranta, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Nuolikorkeuspoikkeamien (NKO20, NKV20) raja-arvot | | | | | | | | |
|---|------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 4 | 4 | 5 | 7 | 8 | 10 | 13 | 17 |
| D | 6 | 6 | 7 | 9 | 10 | 14 | 21 | 28 |
| * | 9 | 9 | 10 | 12 | 14 | 19 | 25 | 36 |

Nuolikorkeutta mitataan 12 metrin mittaisen mittakannan keskeltä kummastakin kiskojo-nosta. Tämän jälkeen ne muutetaan matemaattisesti 20 metrin jänTEELE, tai tarvittaessa 35 metrin tai 70 metrin jänTEELE. Nuolikorkeutta mitattaessa mitataan oikeammin kiskon kaa-revuutta. Näin ollen mittauksissa on nähtävissä kaarrekohdissa kaaren muoto, jolloin myös kaaren säde on laskettavissa tuloksista. (Ratahallintokeskus 2005a)

2.1.5 Kallistus

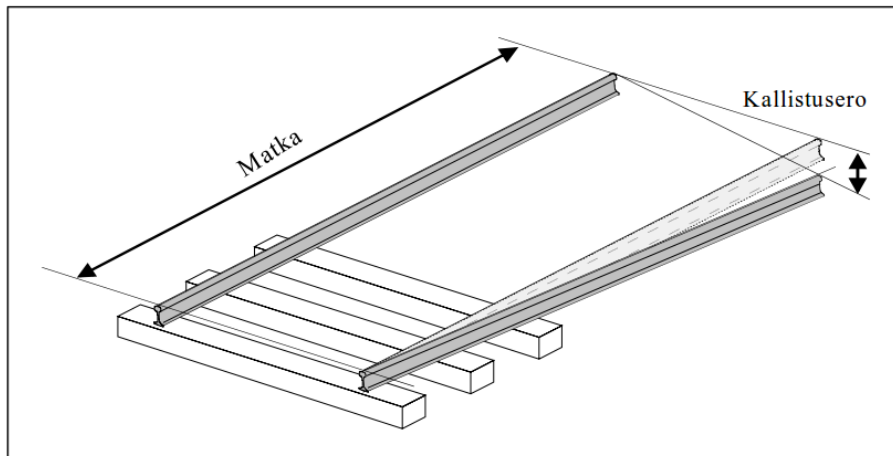
Raiteen kaarteisiin suunnitellaan yleensä kallistus poikittaishiihtyvyyden haittavaikutuk-sien vähentämiseksi sekä halutun nopeuden saavuttamiseksi. Pienillä nopeuksilla ja suu-ren säteen kaarilla kallistus ei aina ole välttämätön. Kallistus kuvaa sisä- ja ulkokiskon korkeuseroa kulkupintojen kohdalta poikittaissuunnassa. Se toteutetaan ulkokaarten puoleista kiskoa korottamalla kallistuksen saavuttamiseksi sisäkaarten puoleisen kiskon pysyessä korkeusviivan määräämällä korkeudella. Tällöin kallistus on positiivinen. Kal-listus voidaan suunnitella myös negatiiviseksi, mutta tätä ei tehdä kuin poikkeustapauk-sissa, esimerkiksi kallistetun kaarrevaihteen erkanevaan poikkeavaan raiteeseen. (Liiken-nevirasto 2010)

Kallistusta suunniteltaessa ihanteellisin tilanne kiskorasituksien kannalta olisi tasapaino-kallistus. Tasapainokallistuksessa kallistus on mitoitettu junan nopeuden suhteen siten, ettei junaan kohdistu poikittaishiihtyvyyttä raiteen tasossa. Tällöin kallistuksen vajauksen arvo on nolla. Kallistuksen vajoaus on tasapainokallistuksen ja todellisen kallistuksen vä-linen ero, eli puuttuva kallistus. Tällöin kallistus olisi tasapainokallistusta pienempi ja aiheuttaisi poikittaishiihtyvyyttä ulkokaarteeseen päin. Kallistuksen vajauksen muutos-nopeutta käytetään siirtymäkaaren pituuden mitoituksessa. (Liikennevirasto 2010)

Kallistuksen vajoaus voi saada myös negatiivisia arvoja, jolloin puhutaan liikakallistuk-sesta. Tällöin keskipakovoiman aiheuttama poikittaishiihtyvyys on sisäkaarten suun-taan, sillä kallistus on liian suuri kyseiselle nopeudelle. Näin voi käydä esimerkiksi hi-taasti kulkevalle tavaravaunulle. (Liikennevirasto 2010)

Raiteen kallistuksen mitoituksessa käytetään yleensä tasapainokallistuksen sijaan normaalikallistusta, joka jättää kallistuksen hieman vajaaksi. Tällöin matkustajalle jää tietoisuus, milloin juna kulkee kaarteessa. Koska radan kaarteessa kulkevan kaluston nopeus vaihtelee, tulee raiteen kallistus määrittää kompromissina erilaisten junien kesken. Tällöin radan kallistus tulee mitoittaa junapainoilla painotetuille junien keskinopeuksille. Myös liikakallistuksen maksimiarvo hitaille junille ja kallistuksen vajauksen maksimiarvo nopeimmille junille tulee huomioida ongelmien välttämiseksi. Jos kallistuksen sijaan mitoituksessa käytetään poikittaiskiihtyvyyden arvoja, poikittaiskiihtyvyyden maksimiarvo ei saa ylittyä nopeilla junilla eikä negatiivinen poikittaiskiihtyvyyden arvo hitailla junilla. (Liikennevirasto 2010; Taimela 2011)

Kallistuksen poikkeamaa kutsutaan kieroudeksi. Kierous kuvaa vierekkäisten kiskojen kallistuseroa eli kallistuksen muutosta (kuva 10). Kierous voidaan määrittää mittaamalla vierekkäisten kiskojen kallistusten eroa kahdesta kohdasta määrätyn etäisyyden päästä toisistaan. Mittaaminen voidaan suorittaa joko mittalaitteella tai kierous voidaan todeta myös laskennallisesti kallistuksen arvoista. (Ratahallintokeskus 2005a; Ratahallintokeskus 2006)



Kuva 10. Radan kierous. (Ratahallintokeskus 2006)

Taulukossa 5 ja 6 on esitetty mitattavien suureiden raja-arvoja ja niille määritetyt kunnossapitotasot ja virheluokat. Kaikki mitat ovat poikkeamia perusviivasta ja ovat esitettyinä millimetreinä. Kierousvirheen taulukossa on lisäksi esitetty myös viisteluvun arvo, joka on esitettyistä arvoista ensimmäinen. Arvostelussa käytetään kuitenkin millimetrien arvoja. Kieroudelle on käytetty 3,5 metrin mittakantaa.

Taulukko 5. Kallistuspoikkeamille asetetut raja-arvot [mm]. Kaarteissa ulkokaarteeseen päin oleva kallistus on aina *-luokan virhe. C-luokan virhe vaatii seurantaa, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Kallistuspoikkeamien (KALS) raja-arvot | | | | | | | | |
|--|------------------|----|---|----|----|----|----|----|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 3 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 9 | 10 |
| D | 5 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 13 | 15 |
| * | 8 | 8 | 9 | 11 | 12 | 15 | 19 | 21 |

Taulukko 6. Kieroudelle asetetut raja-arvot. Kierous on esitetty viistelukuna ja millimetreinä. C-luokan virhe vaatii seurantaa, D-luokan virhe korjauksen lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe välittömiä toimenpiteitä. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Kierouden (KIER) raja-arvot | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Virheluokka | Kunnossapitotaso | | | | | | | |
| | 1AA | 1A | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| C | 1160/3 | 1160/3 | 700/5 | 585/6 | 500/7 | 440/8 | 390/9 | 350/10 |
| D | 500/7 | 500/7 | 440/8 | 390/9 | 350/10 | 290/12 | 250/14 | 220/16 |
| * | 390/9 | 390/9 | 320/11 | 290/12 | 270/13 | 235/15 | 205/17 | 165/21 |

Kierous esitetään joko viistelukuna tai millimetreinä määritetyllä mittakannalla. Suunniteltua kallistuksen muutosta esimerkiksi siirtymäkaarissa ei lasketa kieroudeksi, mutta se ei kuitenkaan saa ylittää ohjeiden viisteluvun vähimmäisarvoja. Siirtymäkaarissa esiintyvä kierous näkyy eri tavoin riippuen siirtymäkaaren tyypistä. (Ratahallintokeskus 2005a; Ratahallintokeskus 2006; Liikennevirasto 2010)

2.2 Kunnossapitoluokitus

Radan geometrialle on asetettu tarkat laatuvaatimukset radan hyvän ja turvallisen toiminnan varmistamiseksi. Laatua seurataan erilaisin raja-arvoin, jotka löytyvät Liikenneviraston ratateknisistä määräyksistä ja ohjeista, ja jotka noudattavat myös Euroopan parlamentin ja neuvoston määrittämiä direktiivejä sekä eurooppalaisia standardeja. (Ratahallintokeskus 2002) Kullekin poikkeamalle määritellyt raja-arvot on esitelty luvussa 2.1.

Kunnossapidon tavoitteena on ensisijaisesti liikenneturvallisuus. Radan kunnon tulee kestää sillä liikennöivä kalusto ja tarvittaessa kunnossapitäjä voi asettaa vaurioituneelle radalle tilapäisiä nopeusrajoituksia. Radan kunnon tunteminen onkin kunnossapitäjälle turvallisuuden varmistamiseksi tärkeää. Silloin myös kunnossapitotoimenpiteiden ajoittaminen onnistuu niin, että ne ovat taloudellisesti järkeviä. Tämä vaatii radan kunnon seuraamista erilaisin tarkastuksin, mittauksin ja tutkimuksin. Radan kunnon arvioinnin apuna toimivat radan kunnon laatuvaatimukset. (Ratahallintokeskus 2000)

Radan kunnon laatuvaatimusten perusteella on laadittu kunnossapitotasokohtaiset virheluokitukset. (Ratahallintokeskus 2005a)

Kunnossapitotasossa on kolme virheluokkaa, C-, D- ja *-luokat:

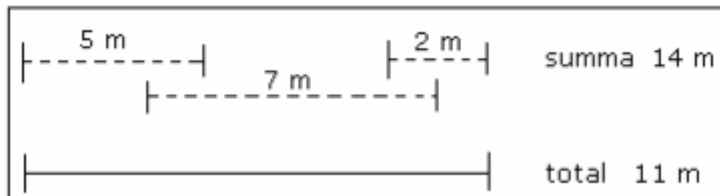
- C-luokan virhe on alkava virhe ja vaatii seuranta
- D-luokan virhe on lähitulevaisuudessa korjausta vaativa virhe
- *-luokan virhe vaatii välittömiä toimenpiteitä

Luokan *-virhe vaatii havainnon jälkeen välittömiä toimenpiteitä. Radalle voidaan esimerkiksi määrätä nopeusrajoitus, kunnes virhe on korjattu. Nopeusrajoitus on määritettävä niin alhaiseksi, ettei virhe enää kuulu kunnossapitotason *-luokan virheeksi ja tarvittaessa liikenne on keskeytettävä. (Ratahallintokeskus 2005a)

Radan kunto määritellään rataosakohtaisin yhteenvedoin sekä kilometriyhteenvedoin. Kukin kilometri saa arvosanan sen mukaan kuinka monta D-luokan virhemetriä se sisältää (taulukko 7). Virhemetrejä arvioidessa otetaan mukaan kaikki ohessa esitetyt mitattavat suureet. Virhemetrimäärää ei kuitenkaan lasketa virhemetrien summana, vaan kokonaisvirhemetrimääränä. Tällöin päällekkäiset virheen alueet lasketaan vain yhtenä virhemetrinä (kuva 11). (Ratahallintokeskus 2005a)

Taulukko 7. Kilometriarvostelun virherajat. (Ratahallintokeskus 2005a)

| Arvostelu | D-luokan virhemetrimäärä/km |
|--------------|-----------------------------|
| Kiitettävä | = 0 |
| Hyvä | ≤ 10 |
| Tyydyttävä | ≤ 25 |
| Epätydyttävä | > 25 |



Kuva 11. Esimerkki, miten kokonaisvirhemäärä muodostetaan. (Ratahallintokeskus 2005a)

Jos kilometrillä esiintyy *-luokan virhe eli erittäin suuri yksittäinen virhepoikkeama, vaikuttaa se huomattavasti kilometrin arvosteluun hyvien kilometrien osuudelta. Näin ollen kilometri saa automaattisesti arvosanan tyydyttävä, vaikka sen virhemetrit olisivat muuten arvosteltu arvosanalla hyvä. (Ratahallintokeskus 2005a)

Virhemetrimäärien mukaan määritetään lopulta kuntoindeksi eli geometrisen kunnan palvelutaso (GKPT). Palvelutason luku on 100 %, jos se täyttää kaikki päällysrakenteelle määritetyt geometrisen kunnan vaatimukset. (Ratahallintokeskus 2005a)

Euroopan standardissa EN 13848-5 on esitetty kolme virheluokkaa, joissa arvioidaan geometriavirheitä suurimman sallitun nopeuden mukaan:

- AL eli Alert Limit viittaa arvoon, jonka ylittyessä tilanne pitää analysoida sekä ottaa huomioon jatkossa säännöllisen kunnossapidon suunnittelussa
- IL eli Intervention Limit viittaa arvoon, jonka ylittyessä vaatii korjaavaa kunnossapitoa, jotta vika ei pahene ennen seuraavaa tarkastusta
- IAL eli Immediate Action Limit viittaa arvoon, jonka ylittyessä vaaditaan toimenpiteitä raiteiltasuistumisriskin ehkäisemiseksi. Riski voidaan vähentää hyväksyttävälle tasolle sulkemalla rata, pienentämällä nopeusrajoitusta tai korjaamalla radan geometriaa.

Kun tarkastellaan edellä esitettyä standardia sekä suomalaista virheluokitusta, huomataan niiden toimenpiteiden olevan varsin yhteneviä.

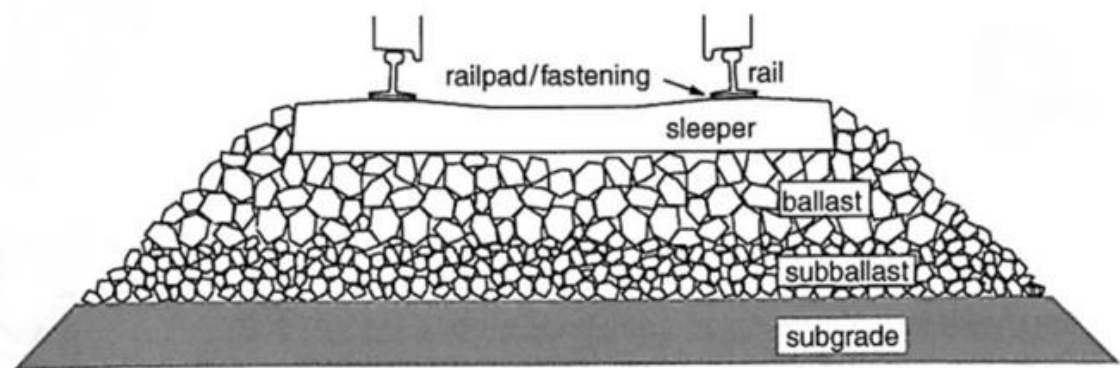
3. EPÄTASAISUUKSIEN SYNTY JA SYYT

Kaluston aiheuttama kuormitus ratarakenteissa saa aikaan muodonmuutoksia radan eri osissa. Erityisesti kovassa kuormituksessa oleviin kiskoihin syntyy erilaisia epätasaisuuksia ja vikoja iskumaisen ja jatkuvan kuormituksen yhteydessä. Kiskon epätasaisuudet voivat olla peräisin lyhytaikaisestakin kuormituksesta ja ovat usein pienemmän aallonpituuden epätasaisuuksia kuin radan muista rakenteista, kuten pohjamaan painumisesta johtuvat epätasaisuudet.

Tässä luvussa esitellään radalle aiheutuvia kuormituksia ja niiden välittymistä ratarakenteessa. Lopuksi esitellään erityyppisiä kiskovikoja ja miten radan epätasaisuuksia voidaan mitata. Luvussa 4 perehdytään radan jäykkyysvaihteluun ja sen myötä syntyviin epätasaisuuksiin.

3.1 Kuormitusten välittyminen ratarakenteessa

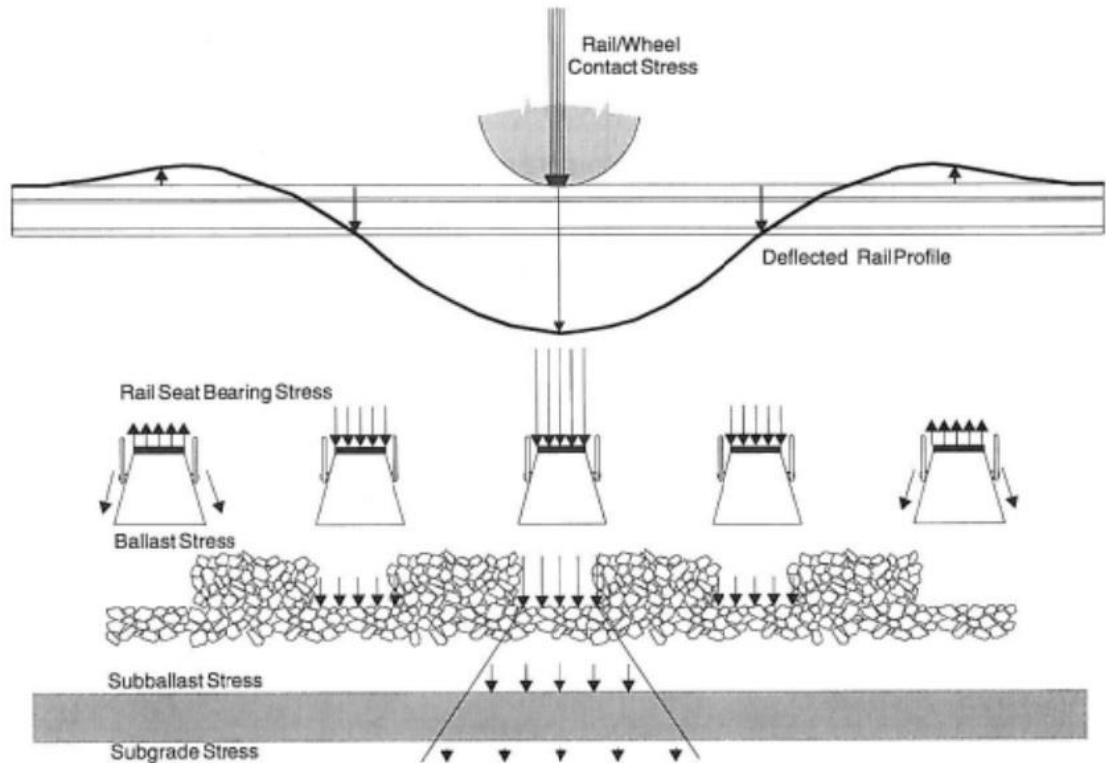
Tässä luvussa käsitellään pääpiirteittäin ratarakenteeseen välittyvien kuormitusten jakautumista ja siirtymistä radan eri päällysrakenteen osien välillä. Radan rakenne koostuu kiskoista, kiskonaluslevystä, kiskon kiinnitysosista, ratapölkyistä, tukikerroksesta, väli- ja eristyskerroksesta sekä pohjamaasta, jotka näkyvät myös kuvassa 12. Aihetta on käsitelty syvällisemmin Ossi Peltokankaan diplomityössä ”Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen”.



Kuva 12. Radan pelkistetty rakenne. (Iwnicki 2006)

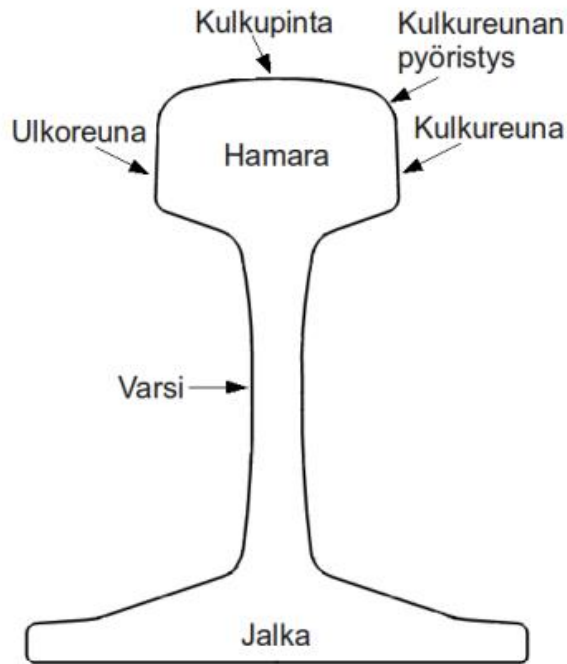
Kuvassa 13 on esitelty junan pyörän staattisten voimien jakautumista alapuolisissa rakenteissa. Rataan kohdistuva pystysuuntainen kuormitus ei ole vakio radan pituussuunnassa, vaan vaihtelee pyörän sijainnin mukaan. Kiskoille tuleva kuormitus jakautuu ratapölkyiltä raidesepeleihin siten, että pyörän alla olevan ratapölkyyn oletetaan jakavan puolet tulevasta kuormituksesta. Kuormituksen edetessä raidesepeleissä alaspäin se pienenee ja vä-

littyy laajemmalle alueelle. Kuvasta voidaan myös nähdä kuinka pyörän etu- ja takapuolel-
 le muodostuu kiskoa nostava voima, joka aiheuttaa ns. pumppautumisilmiötä ja ratara-
 kenteen hienontumista. (Kalliainen et al. 2014)



Kuva 13. Pystysuuntainen kuormitus jakautuneena radan eri rakennekerroksille. (Kalliainen et al. 2014)

Kiskon profiili koostuu leveästä yläosasta eli hamarasta, korkeasta varresta sekä leveästä jalasta, jotka on esitetty kuvassa 14. Kiskon muutokset näkyvät yleensä erilaisina epätasaisuuksina hamarassa. (Rail Corporation New South Wales 2009) Suomessa kiskoprofiilit ovat suurimmaksi osaksi joko 60E1 (48 %) tai 54E1 (36 %) profiileita (Liikennevirasto 2014) Radan tehtävänä on toimia tasaisena kulkupintana kalustolle ja ohjata sitä oikeaan suuntaan. Se myös jakaa kuormia eteenpäin ratapölkyille sekä toimii sähköisten viestien välittäjänä. (Iwnicki 2006)



Kuva 14. Kiskon eri osat. (Kauppinen 2011)

Kiskon kiinnitysten tehtävä on rajoittaa kiskon liikkumista. Kalusto voi aiheuttaa kiskoihin voimakkaita kaatavia tai kiertäviä momenteja, joita kiskon kiinnitysten tulee kestää. Kiinnitykset estävät myös kiskon nousemista ylöspäin sekä poikittaissuuntaisia liikkeitä. Varsinkin laippakosketuksessa raidetta levittävät voimat ja ohjausvoimat voivat olla suuria. Kiinnitysten tulisi kestää myös kiskon pituussuuntaisia liikkeitä sekä kiertymistä. (Hakulinen et al. 2012)

Kiskon ja betonipölkyn välissä käytetään välilevyä suojaamaan pölkkyä iskuilta ja kulumiselta. Puupölkkyillä ei välilevy ole välttämättä tarpeen niiden luontaisen joustavuuden takia. Välilevyllä on merkittävä vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen ja se auttaakin kuormien jakautumisessa kiskolta ratapölkkyihin ja sitä kautta myös alusrakenteisiin. Välilevyllä on merkittävä vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen. (Iwnicki 2006). Välilevyn materiaalina voi olla esimerkiksi luonnonkumia, korkin ja kumin sekoitusta tai etyyliivinyyliasettaattia (EVA) ja se voi vaihdella pinnoitukseltaan ollen sileää, nastoitettua tai urakuvioitua (Esveld 2001).

Ratapölkkyt pitävät kiskon oikeassa tasossa ja asennossa sekä johtavat kalustosta välittyvät voimat radan alempiin kerroksiin. Nykyään käytetään pääsääntöisesti betonipölkkyjä, mutta myös puuratapölkkyjä ja teräspölkkyjä on olemassa. (Esveld 2001) Suomessa teräspölkkyjä ei ole tilastojen mukaan käytössä ja puuratapölkkyjä on enää muutamalla vähemmän liikennöidyllä välillä. Vuonna 2013 72 % radasta oli varustettu betonipölkkyillä. (Liikennevirasto 2014)

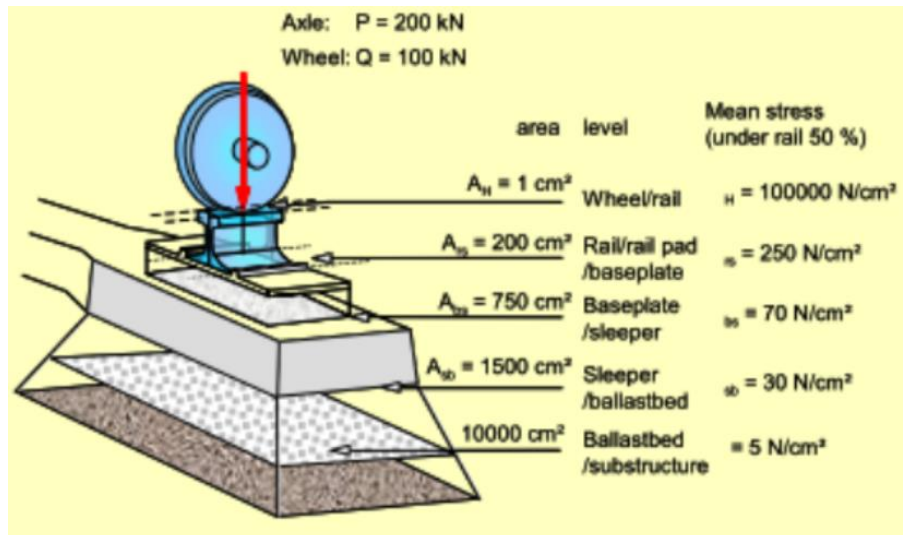
Raiteen tukikerroksen tehtävinä on pitää raide geometrisesti oikeassa asennossa ja asemassa sekä muodostaa raiteille tasainen ja kantava alusta. Se myös välittää kaluston pölkylle aiheuttaman kuormituksen edelleen alempiin rakennekerroksiin. Tukikerroksessa käytetään raekooltaan 31,3...63 mm raidesepeliä, ja sen paksuus vaihtelee välillä 350 mm – 550 mm ratapölkyn ja raidetyypin mukaan. Jatkuvakiskoisessa betoniratapölkkyraiteessa tukikerroksen paksuus on tyypillisesti 550 mm. (Ratahallintokeskus 2002; Ratahallintokeskus 2004)

Välikerros rakennetaan tukikerroksen alle, jolloin se muodostaa tukikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan estäen tukikerroksen sekoittumisen alempiin rakennekerroksiin. Eristyskerros taas estää tai vähentää alla olevien maakerrosten routimista muodostaen välikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan jakaen kuormat lopulta pohjamaalle. Eristyskerroksen tehtävänä on myös pysäyttää veden kapillaarinen nousu sekä toimia suodatinkerkoksena. (Ratahallintokeskus 2008)

Pohjamaalla tarkoitetaan ratapenkereen alla olevaa maata, joka voi koostua useista eri maalajeista. Pohjamaa voi olla luonnontilainen tai lujitettu ja maalajeistaan riippuen se voi olla joko routimaton tai routiva. Pohjamaa voi olla hyvin vaihteleva jopa lyhyellä matkalla. (Ratahallintokeskus 2008)

3.2 Kiskolle aiheutuvat kuormitukset

Monet geometrian ongelmat johtuvat kiskovioista. Kiskojen epätasaisuudet kuten kuluminen voivat näkyä radan kunnan mittauksissa esimerkiksi korkeuspoikkeamina tai raideleveyden muutoksina. Lisäksi kiskosta johtuvat epätasaisuudet voivat aiheuttaa muuhun ratarakenteeseen dynaamisia kuormituksia kaluston yliajaessa. Kuvassa 15 on esitetty kiskoille aiheutuvan kuormituksen jakautumista kiskon alaisiin kerroksiin eri suunnissa. Kiskoihin tuleva staattinen ja dynaaminen kuormitus jakautuu pysty- poikittais- ja pitkittäissuunnassa radalla kuormittaen kaikkia radan rakennekerroksia sekä pohjamaata. Radan pituussuuntainen kuormitus välittyy jäykän kiskon kautta laajalle alueelle. Kiskolta kuormitus välittyy pölkylle, joka välittää kuormitusta radan alemmille rakenteille.



Kuva 15. Pyörästä kiskoon aiheutuneet jännitykset pysty-, poikittais- ja pitkittäissuunnassa. (Esvelde 2001)

Ensisijaisesti kiskon käyttäytymiseen vaikuttaa yli kulkenut kalusto, radan muut rakenteet sekä kiskon laatu. Kiskojen yli kulkenut kalusto voi aiheuttaa kiskon kulumista, painumista, väsymistä, kiskoon kohdistuneita iskuja esimerkiksi lovipyörästä, sekä pintavikoja pyörän ympärilyönnistä, ryöminnästä ja liukumisesta. Näiden lisäksi radan muut rakenteet, kuten paksuudeltaan ja materiaaliltaan vaihteleva tukikerros tai muut rakennekerrokset, voivat aiheuttaa epätasaisia painumia. Kiskon huono laatu edistää kiskon muodonmuutoksia ja kisko voi myös ruostua. (Ratahallintokeskus 2002)

Pystysuuntaiset kuormat voidaan jakaa kolmeen pääkomponenttiin:

- Junan painosta aiheutuva staattinen komponentti, joka riippuu junan akselipainosta.
- Dynaaminen komponentti, joka johtuu junan kuorman liikkeistä nopeuden suhteen radan geometriassa.
- Iskumainen voima, joka syntyy lyhyistä geometrisista epätasaisuuksista tai pyörän epätasaisesta muodosta

Radan rakenteellisen vaurioitumisen kannalta dynaamiset kuormitukset ovat erityisen ongelmallisia, sillä ne kohdistuvat usein aina samaan kohtaan radalla. Tämä aiheuttaa herkästi muodonmuutoksia ja geometriapoikkeamia. Kiskoon poikittaissuuntaisesti vaikuttavat voimat korostuvat yleensä kaarteissa, jolloin laippa osuu kiskoon telin riittämättömien kaarreominaisuuksien takia. Jyrkissä kaarteissa sivusuuntainen voima on yleensä tasaista, mutta loivissa kaarteissa tai jopa suoralla voi muodostua huomattavia dynaamisia voimia pyöräkerran joutuessa epästabiliin heilahteluliikkeeseen (hunting movement). (Rail Corporation New South Wales 2009; Korkeamäki 2011)

Raiteen pituussuuntaiset voimat aiheutuvat, kun pyörä aiheuttaa kiskoon liikkeellään vetoa. Nämä voimat syntyvät kaluston jarruttaessa, kiihdyttäessä tai luistosta. Luisto voi

aiheuttaa myös vaakasuuntaisia voimia, jos siihen yhdistyy poikittaissuuntaista heilahtelevaa liikettä. Usein luiston aiheuttamia voimia syntyy silloin, kun pyörä tulee kaarteseen huonossa kulmassa. (Rail Corporation New South Wales 2009; Iwnicki 2006)

Kiskoon aiheutuu myös taivutusvoimia, lämpövoimia ja jäännösvoimia. Taivutusvoimat johtuvat edellä esitetyistä pysty- ja poikittaissuuntaisista kuormituksista, jotka saattavat aiheuttaa erisuuntaisia taipumia. Pystysuuntainen voima voi aiheuttaa radan taipumista pölkkyjen välissä tai hamaran taipumista jalkaan nähden. Tämä yhdistyneenä iskumaiseen voimaan radan tai kiskon muodonmuutosten takia aiheuttaa lisävääntöä kiskoon. Sivusuuntaiset voimat taas voivat aiheuttaa hamaran poikittaissuuntaista liikettä, joka lisää kiskon jalan jännityksiä. (Rail Corporation New South Wales 2009)

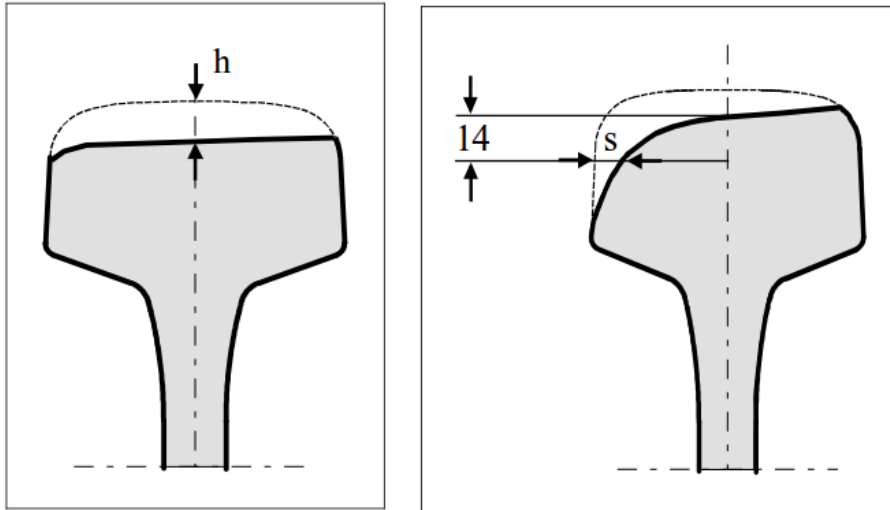
Lämpövoimat ja jäännösvoimat eivät johdu kaluston vaikutuksista, vaan kiskon ominaisuuksista. Lämpövoimat aiheuttavat pituussuuntaisia jännityksiä lämpöliikkeen myötä. Jäännösvoimat muodostuvat kiskoon jo valmistusvaiheessa. (Rail Corporation New South Wales 2009)

Oleellista kiskon kuormituksissa on yliajaneet bruttotonnit.. Näin ollen raiteistoille on asetettu sallitut kuormitukset, jotka selviävät vuosittaisesta Liikenneviraston julkaisusta ”Rataverkon kuvaus”. (Liikennevirasto 2013) Kuormitukset on määritelty rataosakohtaisesti tavarajunien akselipainojen ja matkustajajunien kokoonpanon perusteella. Myös venäläisen standardin mukaisille vaunuille on määritelty omat maksiminopeutensa ja akselipainonsa eli 22,5 t.

3.3 Kiskoviat

Radalla voi esiintyä monenlaisia kiskovikoja, kuten kiskoatkosten taipumista, kulumista, läätistymistä, purseen muodostumista ja sen seurauksena kiskonpään lohkeamista, virheelisiä jatkosrakojia, sidekiskon taipumista, sidekiskojen ja sidekiskosijojen kulumista, sideruuvien löystymistä ja muita pintavikoja. Vikojen syntyyn vaikuttaa kiskon laatu sekä yliajaneet bruttotonnit. Myös radan muilla rakenteilla on vaikutusta esimerkiksi taipumien muodostumiseen. (Ratahallintokeskus 2002)

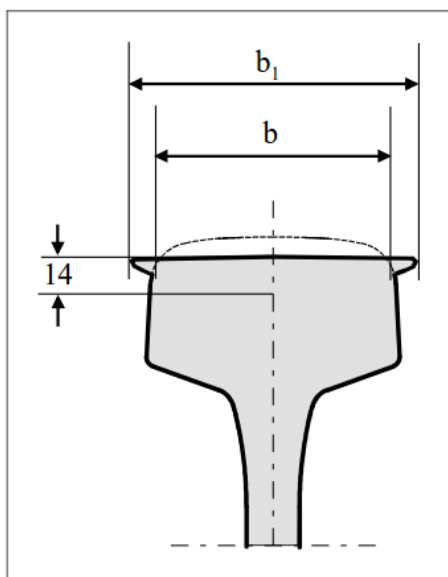
Kiskojen kulumisen voi tapahtua kulkupinnan kulumisella sekä korkeus- että sivusuunnasta kiskon normaaliin poikkileikkaukseen nähden (kuva 16). Korkeuskulumisen mitataan kiskon pystysuuntaisena kulumisena poikkileikkauksen keskiviivan kohdalta.



Kuva 16. Kuvassa vasemmalla esitetty kiskon pystysuuntainen kuluminen ja oikealla kiskon sivusuuntainen kuluminen. (Ratahallintokeskus 2006)

Kiskon sivukuluneisuus mitataan hamaran sivusuunnasta leveyden muutoksena verrattuna poikkileikkauksen keskilinjaan. Sivukuluneisuutta mitataan 14 mm hamaran todellisen kulkupinnan alapuolelta. Nykyisillä kiskoteräslaaduilla esiintyy lähinnä vain sivukuluneisuutta, joka johtuu laipan aiheuttamista voimista erityisesti pienisäteisissä kaarteissa. (Rail Corporation New South Wales 2009) Kiskojen kuluminen saattaa aiheuttaa raideleveyden kasvamista ja kiskon korkeuden muuttumista (Ratahallintokeskus 2006)

Toinen raideleveyttä muuttava kiskovika on kiskoon muodostuvat purseet (kuva 17). Purseet muodostuvat kiskon hamaran litistytessä ja levitessä, jolloin kiskon korkeus alenee ja hamaraan muodostuu raideleveyttä kaventavat purseet. Purseiden muodostuminen huonontaa merkittävästi suurilla nopeuksilla liikkuvan kaluston kulkuominaisuuksia. (Ratahallintokeskus 2006)



Kuva 17. Kiskoon muodostunut purse. (Ratahallintokeskus 2006)

Purseet mitataan 14 mm kiskon kulumispinnan alapuolelta purseen leveimmästä kohdasta kiskon kulkureunasta. Purseen muodostumiselle ei ole määritelty omia raja-arvoja, vaan niille käytetään aiemmin luvussa 2.1.2 esiteltyjä raideleveyden kapeneman raja-arvoja. (Ratahallintokeskus 2006)

Kiskoon muodostuva korrugaatio on syklistä aaltomaista epäsäännöllisyyttä, joka muodostuu raiteeseen pituussuunnassa. Korrugaatiota esiintyy lyhytaaltoisina (30 – 90 mm) ja pitkäaaltoisina (yli 300 mm) heittoina, jotka muodostuvat erilaisilla kuormituksilla. Lyhytaaltainen korrugaatio muodostuu yleensä kevyemmillä akselipainoilla (<20 tonnia) esimerkiksi matkustajajunilla. Pitkäaaltoinen korrugaatio vaatii raskaamman kaluston, jossa akselipaino on suurempi (>20 tonnia). Lyhytaaltainen korrugaatio syntyy pyörän liukumasta esimerkiksi kiihdytyksen, jarrutuksen tai poikittaissuuntaisen liikkeen myötä. Pitkäaaltoinen korrugaatio taas syntyy plastisen virtauksen (Plastic flow) seurauksena. (Rail Corporation New South Wales 2009)

Lyhytaaltoisen korrugaation syvyys on 0,2 – 0,3 mm, mutta pitkäaaltoisella korrugaatiolla syvyys voi olla jopa 2 mm. Raiteen korrugaatio lisää dynaamisia kuormituksia sekä tärinää, jolloin se aiheuttaa lisäongelmia sekä radalle että kalustolle. Korrugaation seurauksena kiskoihin saattaa esimerkiksi muodostua lisävaurioita tai ratapenkereen kiviaines saattaa hienontua ja pyöristyä. (Rail Corporation New South Wales 2009)

Kiskossa esiintyy myös muita pystysuuntaisia vikoja. Tällaisia ovat esimerkiksi korrugaatio, pyörän ympärilyöntijäljet, kulkupinnan lävistymä, väsyminen, squat ja muut pintaviat. Myös muunlaisia pintavikoja esiintyy, kuten vierintäväsymisestä johtuvaa säröilyä, kiihdytyksestä ja jarrutuksesta johtuvia ympärilyöntijälkiä, kiskon pinnan alle muodostuneista sälöistä johtuva painuma (squat) sekä lävistymiä. Kiskoihin voi muodostua myös muita pintavirheitä, kuten suomuilua, pitkiä uria ja uurteita. Kaikki kiskon pinnan epätasaiseksi muuttavat epätasaisuudet aiheuttavat dynaamisten kuormitusten kasvamista. Myös kisko jatkokset lisäävät raiteeseen kohdistuvia kuormituksia. (Ratahallintokeskus 2002; UIC 2002; Rail Corporation New South Wales 2009)

Raiteen poikittaissuuntaiset virheet esiintyvät yleensä kaarteissa. Nuolikorkeusvirheet ovat erityisen haitallisia yhdistettynä saman kohdan kallistusvirheeseen eli kierouteen, sillä se aiheuttaa suistumisen riskin jyrkkäkaarteisilla radoilla kuten sivuradoilla tai satama- ja teollisuusalueella. Tyypillinen virhe on kisko jatkoksen päiden muodostama kulma eli sivupiikki, jos kiskoja ei ole koko pituudeltaan taivutettu kaarresäteelle sopivaksi tai raide ei ole pysynyt paikoillaan jatkosten kohdalla. (Ratahallintokeskus 2002)

Kiskoon voi myös muodostua vikoja hamaran sisäpuolelle, jalkaan, varteen ja hitsaus-saumoihin (UIC 2002) Niitä ei ole käsitelty tässä, sillä ne eivät suoraan vaikuta kulkupintaan (ja näin ollen junan dynaamiseen käyttäytymiseen), elleivät ne aiheuta kiskon kulkupintaan murtumaa, halkeamaa tai jotain edellä mainituista vioista.

3.4 Radan epätasaisuuksien mittausmenetelmät

Mahdollisten vikojen esiintymisen vähentämiseksi radan kuntoa seurataan erilaisin mittauksin, jolloin mahdolliset viat voidaan paikantaa mahdollisimman aikaisin tai ennakoida vian syntymistä. Näin voidaan varmistaa liikenteen turvallisuus ja ennakoida huolto- ja korjaustarpeet, jotta palvelutaso vastaa sille asetettuja tavoitteita. Koko Suomen rataverkosto tarkastetaan vähintään kaksi kertaa vuodessa, mutta korkeimpien ajonopeuksien osuudet käydään läpi useammin, jopa parin kuukauden välein. (Ratahallintokeskus 2006; VR Track 2015)

Radan epätasaisuuksia ja kuntoa mitataan Suomessa mittausvaunulla (ELLI) ja tarkastusvaunulla (EMMA). Tarkastusvaunulla mitataan radan geometrista kuntoa eli raidelevyettä, kallistusta, korkeuspoikkeamaa, kieroutta ja nuolikorkeutta, kun taas mittausvaunulla mitataan kiskon kuluneisuutta ja ajolankojen kuntoa. Mitattujen arvojen tulee noudattaa aiemmin esiteltyjä virheluokituksia. Mittausvaunuilla tehtävien tarkastusten lisäksi ratojen kuntoa voidaan seurata ultraäänitutkimuksin ja kävelytarkastuksin. (Ratahallintokeskus 2006; Hämeen Sanomat 2007) Kaluston kiihtyvyyksimittauksista ja raja-arvoista on kerrottu luvussa 5.4.3

Tarkastusvaunun (EMMA) mittaus perustuu mittausteleihin, joista kaksi toimii tarkastelupisteinä ja yksi erillisenä mittaustelinä. Suomessa käytössä on 5 metrin mittakanta, joka muunnetaan laskennallisesti 12 metrin telikeskiöiden etäisyydestä. Nuolikorkeuspoikkeamien määrittämiseen käytetään 20 metrin mittakantaa. Näiden avulla voidaan määrittää ajan tai paikan suhteen, paljonko kiskon korkeusasema vaihtelee suhteessa keskimääräiseen kiskon korkeusasemaan verrattuna. Mittakantamittauksen heikkoutena tiedetyt pyörienvälin etäisyydet korostavat joitain aallonpituuksia toisien jäädessä todellisuutta vaimeammiksi. (Peltokangas et al. 2013)

Tarkastusvaunun mittauksista saadaan monenlaista dataa, josta voidaan jatkojalostaa raportteja. Mittauksista saadaan esimerkiksi tarkastuskäyrä, jossa esitellään raidegeometrian suuria piirturin piirtämällä käyrällä. Tästä voidaan nähdä geometrian poikkeamien suuruuksia helposti graafisesti esitettynä. Mitatulta alueelta saadaan myös virhelistaus, joka tulostaa numeerisesti D- ja *-luokan virheet ja virhealueet alku- ja loppukohdan km+m-lukeman. Mittauksista on mahdollista saada myös erilaisia numeerisia yhteenve-toja joko kilometreittäin tai jaettuna eri osuuksiin sekä kokonaisyhteenvetona. Myös vaihteista on saatavilla yhteenveto. (Ratahallintokeskus 2005a; Ratahallintokeskus 2006)

Kiskovikojen varalta raiteelle suoritetaan myös ultraäänitarkastuksia, joissa etsitään kiskosta silmälle näkymättömiä sisäisiä vikoja. Tarkastustiheys riippuu raiteen kunnossapitotasosta, vuosittaisesta kuormituksesta, kiskon väsymisestä tai esiintyvistä vioista sekä raiteilla liikennöivästä kalustosta. Jatkuvakiskoraiteilla, säännöllisen henkilöliikenteen osuuksilla ja sallitun akselipainon ollessa 250 kN on tarkastukset tehtävä vuosittain, ja

muissa kohteissa vähintään viiden vuoden välein. Tarkastuksesta tehdään tarkastuspöytäkirja ja mahdolliset löydetyt viat merkitään kiskoon. Tarkastus tehdään ultraääniluo-
taimella. Kiskoilta voidaan mitata myös kuluneisuuden arvoja tarpeen vaatiessa. (Rata-
hallintokeskus 2006)

4. JÄYKKYYSVAIHTELU

Radan jäykkyysvaihtelulla on merkittävä vaikutus radalle syntyvien epätasaisuuksien ja tätä myötä kalustolle syntyvien värähtelyiden kannalta. Radan alemmista rakennekerroksista tai pohjamaasta lähtöisin oleva painuma on usein pidemmän aallonpituuden geometriavirhe. Radan jäykkyyden määritykseen on olemassa useampi eri tapa. Trafin säädöksessä ”Rautatiejärjestelmän infrastruktuuriosajärjestelmässä” se on määritelty seuraavalla tavalla: ”Kokonaismitta, joka ilmaisee radan kestokyvyn pyöräkuormituksessa tapahtuvaa radan siirtymistä vastaan”. (Trafí 2011)

Tässä luvussa tarkastellaan miten radan eri osat vaikuttavat radan kokonaisjäykkyyteen, millaisia jäykkyysvaihteluja on ja mistä jäykkyysvaihtelu johtuu. Lopuksi käsitellään radan jäykkyysvaihtelun mittauskeinoja. (Trafí 2011)

4.1 Ratamoduuli ja radan jäykkyys

Radan jäykkyyttä voidaan mitata ratamoduulin arvolla tai radan jäykkyydellä. Näiden ero on se, että ratamoduuli ei huomioi ollenkaan kiskon jäykkyyttä, vaan tarkastelee vain sen alapuolisten rakenteiden jäykkyyttä. Radan jäykkyyttä tarkastellessa huomioidaan myös kiskon jäykkyys. Radan jäykkyyteen vaikuttavat siis näin ollen kaikki rakennekerrokset. (Selig & Li 1994)

Selig ja Li esittävät artikkelissaan ”Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It”, että suurimmin ratamoduuliin ja radan jäykkyyteen vaikuttaa pohjamaan ominaisuudet. Pohjamaan jälkeen merkittävin vaikuttava tekijä on tukikerroksen, välikerroksen ja eristekerrosten paksuus sekä välilevyn jäykkyys. (Selig & Li 1994)

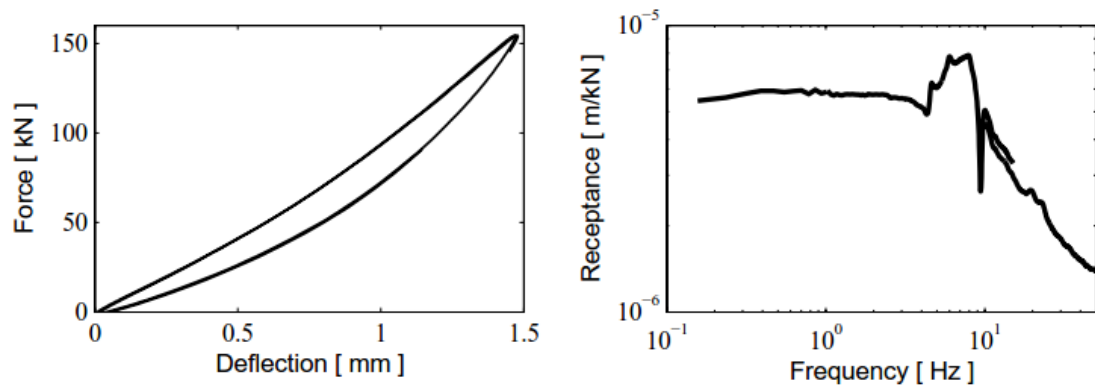
Ratamoduulin tai radan jäykkyyden avulla voidaan mitata radan alapuolisten kerrosten pystysuuntaista jäykkyyttä. Näillä arvoilla voidaan suoraan arvioida radan kuntoa. Hyvä ratamoduulin arvo ei saa olla liian pieni, mutta myöskään liian suuri moduulin arvo ei ole radan rakenteille optimaalinen, sillä molemmista voi aiheutua radalle ongelmia. Ratamoduulin arvoa voidaan mitata kuormittamalla rataa eri tavoin ja mittaamalla radasta saatuja arvoja kuten painumia. Ratamoduulin arvoa voidaan tutkia myös mallintamalla, jos radan komponenteista on saatavissa tarpeeksi tietoa. Radan jäykkyyden erilaisia mittausmenetelmiä on esitelty myöhemmässä luvussa 4.5.

4.2 Staattinen ja dynaaminen jäykkyys

Rataan kohdistuu monensuuntaisia voimia, jotka on esitelty luvussa 3.2. Radalle kohdistuvat kuormitukset jaetaan näin ollen staattiseen ja dynaamiseen komponenttiin. Aiemmin esitelty iskumainen voima on osa dynaamisia kuormituksia, sillä se saa alkunsa junan

liikkeen myötä. Koska dynaaminen kuormitus aiheutuu kaluston liikkeestä, se myös vaihtelee liikkeen ja kontaktipinnan epätasaisuuden seurauksena. Näin ollen dynaamiset kuormitukset voivat olla epätasaisuuksien aallonpituudesta ja junan nopeudesta johtuen korkea- tai matalataajuuksisia. Dynaaminen kuormituslisäys saattaa hetkellisesti olla yli kolminkertainen staattiseen kuormitukseen nähden, ja se usein kohdistuu aina samaan kohtaan radalla. Hun ja Brinkmanin tutkimuksessa ”Key Factors of Subgrade Influencing Dynamic Wheel/Rail Loads at Railway Transition Zones” tehdyn dynaamisen mallinnuksen mukaan 150 km/h nopeudessa 25 mm painuma aiheuttaisi dynaamisen voiman piikin, joka olisi 1,5 kertaa staattista voimaa korkeampi. Dynaamiset kuormitukset kasvavat helposti staattisia kuormituksia suuremmiksi ja vaikuttavat radan profiilin muutosten myötä paikallisemmin. Dynaamisten kuormitusten suuruus ja muuttuvuus aiheuttaa raiteeseen herkemmin kasvavia ongelmia. (Korkeamäki 2011)

Berggrenin tutkimuksessa ”Railway Track Stiffness, Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance” on mallinnettu radan pystysuuntaista jäykkyyttä kuvassa 18. Kuvassa vasemmalla puolella on esitetty radan taipumaa, kun sitä on hitaasti kuormitettu 150 kN voimaan asti. Kuormituksen voidaan ajatella vastaavan radan käyttäytymistä staattisen kuormituksen alaisena. Kuvaajasta nähdään, että radan taipuma ei ole täysin lineaarinen ja kuormituksen poistuessa taipuma ei palaudu samaa linjaa pitkin takaisin, eli taipuma on hystereesinen. (Berggren 2009)



Kuva 18. Vasemmalla puolella on esitetty pystysuoran kuormituksen aiheuttama taipuma radalla kvasistaattisessa kuormituksessa. Oikealla puolella on esitetty radan dynaamisen jäykkyyden käänteisluvun (reseptanssin) suuruus savisella pohjamaalla taajuuden funktiona. (Berggren 2009)

Jotta radan dynaamista jäykkyyttä olisi helpompaa arvioida, oletetaan staattisen esikuormituksen olevan täysin lineaarinen. Tämä ei poikkea juurikaan todellisuudesta, sillä lyhyen aikavälin tarkastelulla käyrä noudattaa hyvin lineaarista käyrää. Dynaamisen jäykkyyden sijaan käytetään kuitenkin mieluummin reseptanssia α (track reseptance), joka on dynaamisen jäykkyyden käänteisluku. Reseptanssia käytettäessä sille usein esitetään suu-

ruus ja vaihe. Reseptanssista on etua tarkasteltaessa voimaohjattua systeemiä, koska tällöin resonanssi-ilmiö voidaan tulkita suurina taipumina, mikä helpottaa dynaamisen jäykkyyden mittaamista. (Berggren 2009)

Kuvan 18 oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty saman radan reseptanssin eli radan dynaamisen jäykkyyden käänteisluvun voimakkuuden kehittymistä esiintymistaajuuden suhteen, kun rataa kuormitetaan 90 kN staattisella voimalla ja 10 kN dynaamisella voimalla. Rata sijaitsee savisella pohjamaalla, jonka johdosta resonanssia esiintyy taajuuksivälillä 5 – 8 Hz. Korkeimmilla taajuuksilla rata käyttäytyy selvästi jäykemmin, mikä on Berggrenin mukaan kaikille radoille hyvin tyypillistä. (Berggren 2009)

Kuvaajien perusteella radan staattisen käyttäytymisen ennustaminen on suoraviivaista. Sen sijaan radan dynaaminen käyttäytyminen on hyvin vaihtelevaa ja vaikeammin ennustettavissa. Kokonaisjäykkyys näyttää osaltaan vaikuttavan kuormitustaajuuden arvoon, vaikka kuormitustaajuuden kasvaessa rata käyttäytyi huomattavasti jäykemmin. Korkean taajuuden kuormituksilla radat siis yleisesti reagoivat jäykemmin kuin matalan taajuuden kuormituksiin. Hun ja Brinkmanin tutkimuksen mukaan radan jäykkyyden kasvulla on selvä trendi kasvavien dynaamisten voimien kanssa radan jäykkyyden rajakohdissa. Toisaalta tutkimuksen mukaan radan painumat altistavat vielä suuremmille dynaamisille voimille. (Hu & Brinkman 2013)

4.3 Radan rakenneosien jäykkyys

Tässä luvussa esitellään radan eri osat jäykkyysvaihtelun kannalta ja miten ne vaikuttavat kokonaisjäykkyyden muodostumiseen. Aihetta on käsitelty laajemmin Ossi Peltokankaan diplomityössä ”Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen”.

Kisko ottaa kalustosta tulevat voimat vastaan välittäen ne seuraaville ratarakenteille. (Iwnicki 2006) Kiskon jäykkyyttä voidaan kuvata kimmomoduulin E ja neliömomentin I avulla. Näiden yhdistelmää EI kutsutaan kiskon taivutusjäykkyydeksi. (Salmi & Pajunen 2010) Suomessa yleisimmin käytössä olevilla kiskoilla 54 E1 ja 60 E1 neliömomenttien I arvot ovat $2346 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ sekä $3055 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$. (Ratahallintokeskus 2002). Kimmomoduulin arvona E eli Youngin moduulin arvona kiskoteräksellä käytetään $207 \cdot 10^3 \text{ MPa}$. (SFS-EN 2008) Kisko on ratarakenteen jäykin osa.

Kiskon ja betonisen ratapölkyn väliin asennettava välilevy käyttäytyy eri tavoin staattisessa ja dynaamisessa kuormituksessa. Välilevyjen jäykkyys on muuta rakennetta pienempi, jolloin se kykenee hyvin vähentämään korkeataajuisia tärinää ratarakenteissa, varsinkin pölkkyissä ja tukikerroksessa. Tämä vähentää esimerkiksi pölkkyyn tulevien vaurioiden määrää. (Grassie 1989) Tyypillisesti ratarakenteissa käytetään suhteellisen jäykkiä välilevyjä. (Esveld 2001)

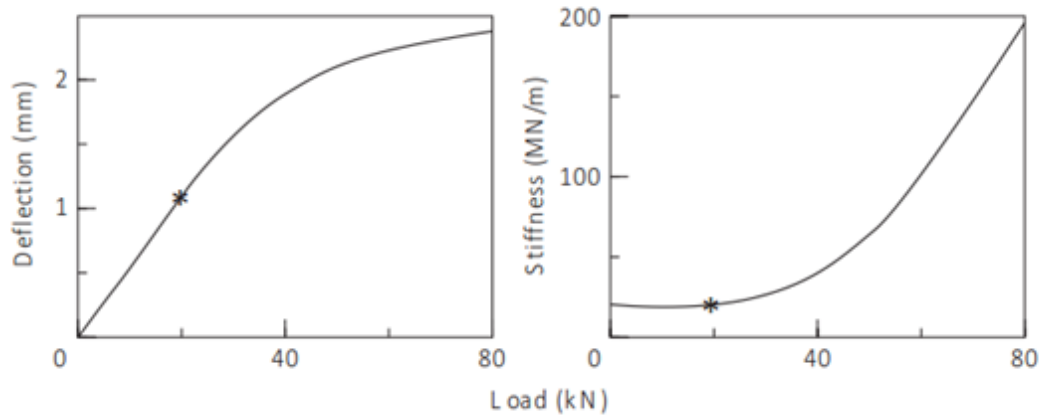
Välilevyn jäykkyyden yksikkö on yleisimmin kN/mm tai MN/m johtuen siitä, että välilevyt mallinnetaan tyypillisesti jousien ja vaimentimien avulla, jolloin jäykkyydellä kuvataan näiden jousien jousivakioita. (Iwnicki 2006)

Välilevyn staattisen jäykkyyden on havaittu pysyvän vähän kuormitettaessa ensin samankaltaisena, jonka jälkeen se alkaa kuormituksen lisääntyessä kasvaa (kuva 19). Samalla kuormituksella saadut dynaamisen jäykkyyden arvot ovat yleensä noin 3-4 kertaiset verrattuna staattisen jäykkyyden arvoihin (taulukko 8). Korkeamman taajuuden dynaamiset kuormitukset aiheuttavat myös suuremman dynaamisen jäykkyyden, vaikka myös staattinen esikuormitus vaikuttaa dynaamisen jäykkyyden muodostumiseen (kuva 20). (Wu & Thompson 1999) Dynaaminen jäykkyys yleensä kasvaa kohtuullisen suoraviivaisesti dynaamisen kuormituksen kasvaessa (Grassie 1989).

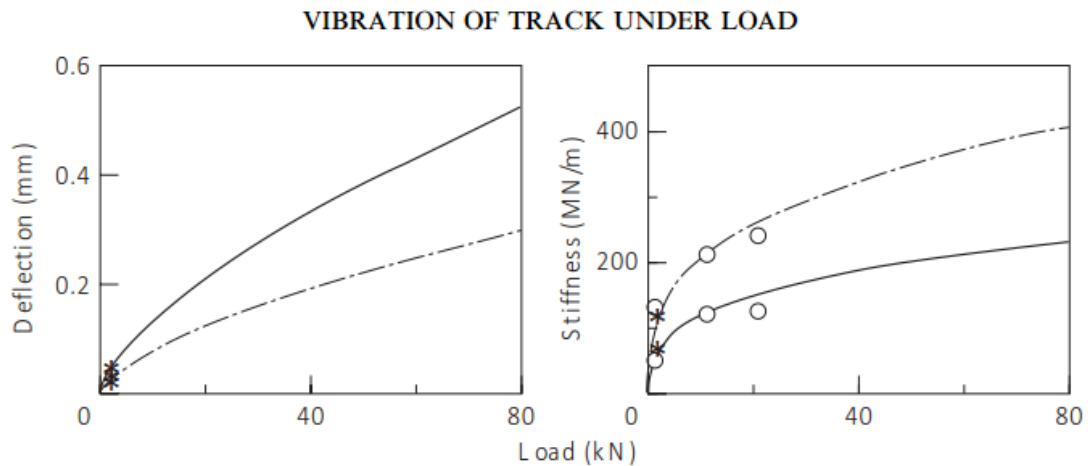
Taulukko 8. Välilevyn staattiset ja dynaamiset kuormituksen arvot Pandrolin nastoitellulla 10 mm paksulla välilevyllä. (Wu & Thompson 1999)

| | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| Preload (kN) | 20 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| Static stiffness (MN/m) | 19 | 25 | 37 | 95 | 200 |
| Dynamic stiffness at 50 Hz (MN/m) | 61 | 82 | 130 | 300 | 650 |
| Dynamic stiffness at 200 Hz (MN/m) | 69 | 92 | 140 | 330 | 690 |
| Dynamic stiffness at 500 Hz (MN/m) | 81 | 110 | 170 | 390 | 780 |
| Dynamic/static stiffness ratio at 50 Hz | 3.2 | 3.3 | 3.5 | 3.2 | 3.3 |
| Dynamic/static stiffness ratio at 200 Hz | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.5 | 3.6 |
| Dynamic/static stiffness ratio at 500 Hz | 4.3 | 4.4 | 4.6 | 4.1 | 3.9 |

Kuvissa 19 ja 20 on esitetty Pandrolin välilevyn nastapinnoitetun 10 mm paksun luonnonkumivälilevyn käyttäytymistä staattisessa ja dynaamisessa kuormituksessa. Kuvaajasta 19 voidaan havaita staattisen kuormituksen aiheuttaman jäykkyyden kasvavan vasta välilevyn saavutettua jo kohtuullinen painuma. Dynaamisessa painumisessa staattisella esikuormituksella on merkittävä rooli. Vaikka suuremman taajuuden dynaaminen kuormitus aiheuttaa suuremman välilevyn jäykkyyden arvon, ovat painumat suuremmat matalamman taajuuden kuormituksen arvoilla. Painumien kannalta staattisella kuormituksella on kuitenkin suurin merkitys. (Wu & Thompson 1999) Yleensä välilevyt mallinnetaan jousen ja vaimentimen avulla, jolloin käytetty dynaamisen kuormituksen taajuus vaikuttaa välilevyn käyttäytymiseen mallissa (Iwnicki 2006).



Kuva 19. Staattisen kuormituksen aiheuttama painuma (vas.) ja staattista kuormitusta mukaileva jäykkyys (oik.). Kyseessä on Pandrolin nastoitettu 10 mm välilevy. (Wu & Thompson 1999)



Kuva 20. Dynaamisen kuormituksen aiheuttama painuma (vas.) ja dynaamista kuormitusta mukaileva jäykkyys (oik.) 50 Hz ja 200Hz kuormituksessa. (Wu & Thompson 1999)

Selig & Li ovat tutkineet myös kiskon kiinnitysten vaikutusta radan kokonaisjäykkyyden muodostumiseen GEOTRACK-mallinnuksen avulla. Tutkimuksen mukaan kiinnitysrakenteista suurin vaikutus radan jäykkyyteen on välilevyllä, joka välittää kiskon pystysuuntaisia voimia. Välilevyllä onkin merkittävä rooli radan kokonaisjäykkyyden muutoksessa, sillä ratamoduulin välilevystä riippuvainen muutos oli parhaimmillaan 70 %. (Selig & Li 1994)

Muiden kiskon kiinnitysten tehtävä on varmistaa kiskon paikallaan pysyminen sekä kuormitusten välittyminen välilevyn kautta (Esveld 2001). Näin ollen niille voi syntyä suuria vaakasuuntaisia staattisia ja dynaamisia kuormituksia, jotka voivat aiheuttaa kiinnitysten rikkoumia. (Williams et al. 2014) Käytännössä kiskon kiinnityksiä ei huomioida radan pystysuuntaisen dynaamisen käyttäytymisen tarkastelussa, sillä kiinnitysten jäykkyys on

välilevyä huomattavasti pienempi eikä sillä näin ollen ole suurta vaikutusta radan käyttäytymiseen. Jos dynaamista käyttäytymistä tarkasteltaessa ei käytetä staattista esikuormitusta, radan kiinnitykset tosin saattavat lisätä välilevyn staattista kuormitusta. (Iwnicki 2006)

Ratapölkkyt voivat olla Suomessa joko puisia tai betonisia, tosin puisia on Suomessa enää harvoin käytössä. Betoniratapölkkyt ovat puupölkkyjä pitkäikäisempiä, mutta herkkiä kovalle iskuille varsinkin taajuuksilla 25–300 Hz. Betonipölkky on myös vähemmän elastinen kuin puu, mikä voi aiheuttaa pölkyn alapuolisen tyhjätilan synnyn ja suurempia dynaamisia kuormituksia. (Esveld 2001)

Ratapölkyn materiaalin valinnalla on myös merkitystä radan kokonaisjäykkyyteen. Selig & Li ovat tutkimuksessaan vertailleet puupölkyn ja betonisen ratapölkyn vaikutuksia radan kokonaisjäykkyyden muodostumiseen, jolloin ratamoduulin arvo on ollut puupölkkyradalla radalla 16 % pienempi kuin betonipölkkyä sisältävällä radalla. Tällöin betonipölkkyä sisältävän radan ratamoduulin arvo olisi 25 MPa ja puupölkkyä sisältävän radan ratamoduulin arvo 21 MPa. Suuri ero johtuu pääosin erilaisista kiskon kiinnitysmekanismeista, jolloin samankaltaisilla kiinnityksillä ero olisi vain 4,7 %. Myös ratapölkkyväliä pienentämällä saataisiin kasvatettua ratamoduulin arvoa, mutta Seligin ja Lin mukaan ratapölkkyvälin vaikutus on suhteellisen vähäinen. (Selig & Li 1994)

Ratapölkyn alle saattaa muodostua tukikerroksen hienontumisen seurauksena ratapölkyn alainen tyhjätila. Tällöin pölkkyyn kohdistuu huomattavan suuria taivutusrasituksia ratapölkyn ollessa tuettuna ainoastaan keskikohdasta, jolloin se voi jopa murtua. Ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan synty johtuu huonosti jakautuvasta kuormituksesta, jolloin suurin rasitus kohdistuu suoraan kiskon alle. Kiviaineksen rakeiden rikkoutumisen kannalta suurin tekijä on maksimikuormituksen suuruus, joka kasvaa epätasaisen kuormauksen tai epätasaisen tukikerroksen seurauksena. (Nurmikolu 2004; Lundqvist & Dahlberg 2005)

Ratapölkyn alaisen tyhjätilan syntyyn johtaa usein tukikerroksen tai pohjamaan jäykkyyden vaihtelu lyhyellä matkalla tai tukikerroksen huono kunto. (Shi et al. 2013) Junan kulkiessa alapuolisen tyhjätilan omaavan pölkyn ylitse nousee ratapölkky aina ennen uutta iskua hieman tukikerroksen pinnasta. Tämä lisää tukikerroksen saaman iskun suuruutta ja nopeuttaa alapuolisen tyhjätilan kasvamista. Tapahtumaa kutsutaan pumppautumiseksi. Jos tukikerroksessa on lisäksi saatavilla vettä, hienontuminen kiviaineksen partikkelien välillä voimistuu. (Nurmikolu 2004)

Tilanne eri pölkkyjen välillä vaihtelee ja jotkut pölkkyt saattavat pitkälle edenneen tyhjätilan laajennettua jäädä täysin ilman tukikerroksen tukea. Tällöin ratapölkky käytännössä roikkuu kiskojen varassa antamatta yhtään tukea kiskolle. (Lundqvist & Dahlberg 2005)

Ratapölkyn alapuolinen tyhjätila aiheuttaa radan jäykkyyden ja näin ollen myös geometrian muutoksia. Tällöin rataa aiheutuu tärinää ja dynaamisia kuormituksia, varsinkin

matalan taajuuden satunnaisia kuormituksia. Äkilliset jäykkyyden vaihtelut radan suunnassa esimerkiksi yhden ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan takia saattavat aiheuttaa myös korkean taajuuden dynaamisia kuormituksia. Huonontuneen jäykkyyden aiheuttamat kuormitukset aiheuttavat ratarakenteille painumia. (Lundqvist & Dahlberg 2005)

Nielsen ja Igeland tutkivat numeerisen mallin avulla pystysuuntaisia dynaamisia kuormituksia yhden ratapölkyn ollessa täysin tukikerrokseen tukeutumaton. Junan nopeuden kasvaessa dynaamiset voimat kasvavat merkittävästi. 150 km/h nopeudessa suurin taivutusvoima oli 22 MPa, kun taas täysin tukeutuneella radalla kuormitus oli vain 16 MPa. Kuormitus siis kasvoi riippuvan ratapölkyn myötä lähes 50 %. (Nielsen & Igeland 1995)

Ratapölkkyjen alapuolisen tyhjätilan tutkiminen on tärkeää, sillä tulevaisuudessa niiden vaikutukset rataa tulevat lisääntymään akselipainojen ja nopeuksien kasvaessa. A. Lundqvistin ja T. Dahlbergin tutkimuksessa "Load impact on railway track due to unsupported sleepers" on mallintamisen avulla tarkasteltu ratapölkkyjen alaisen tyhjätilan vaikutusta muuhun ratarakenteeseen. Jos radalla on vain yksi 1 mm alapuolisen tyhjätilan omaava ratapölkky, nostaisi se viereisten ratapölkkyjen vastaanottamien kontaktivoimien suuruutta peräti 70 % ratapölkyn painuman kasvaessa 40 %. Kuormitusten kasvaminen voi aiheuttaa radalle tukikerroksen epätasaisia painumia, kiskon korrugaatiota ja vahinkoja ratapölkkyille ja välilevyille. Tämän myötä kontaktivoimat ja dynaamiset kuormitukset radalla kasvavat entisestään ja tukikerroksen laatu voi huonontua.

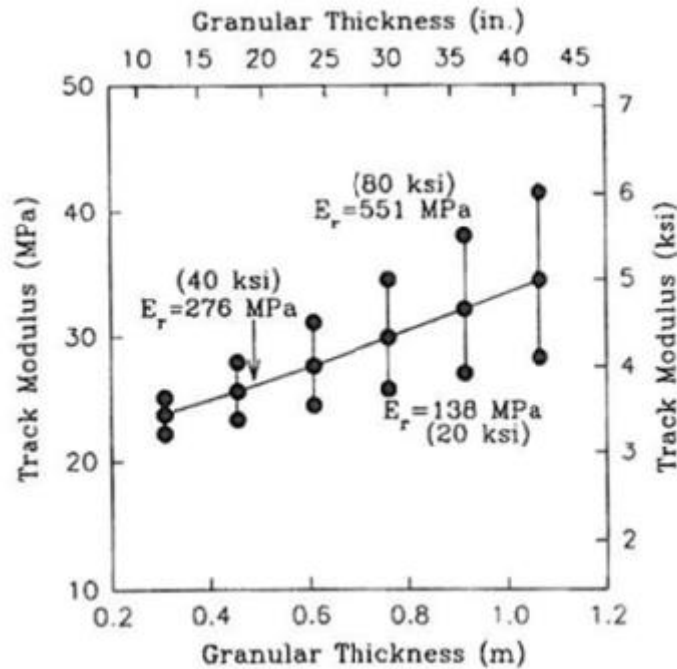
Tukikerroksen ominaisuudet eivät ole yksiselitteisiä, sillä ne vaihtelevat ja muuttuvat radan elinkaaren aikana. Raidesepeli jauhautuu kuormituksen ja iskujen vaikutuksesta, jolloin muodostuu radan jäykkyyteen merkittävästi vaikuttavia ratapölkyn alaisia tyhjätiloja. Myös kunnossapitotoimet, kuten tukeminen, vaikuttavat tukikerroksen ominaisuuksien muuttumiseen. (Kalliainen et al. 2014) Tukikerroksen jäykkyydelle ei aseteta Suomessa vaatimuksia, mutta esimerkiksi raekokoisuusjakaumalle, muotoarvolle ja lujuudelle raja-arvot on määritetty. (Ratahallintokeskus 2002; Ratahallintokeskus 2004)

Selig ja Li ovat tutkineet tukikerroksen vaikutusta radan kokonaisjäykkyyden muodostumiseen. Mallissa tukikerroksen paksuudeksi määriteltiin 0,3 metriä ratapölkyn alapinnasta lukien ja tiheydeksi 1760 kg/m³. Radan kokonaisjäykkyyttä mitattiin tukikerroksen muodonmuutosmoduulin arvolla 138 MPa ja 551 MPa, jolloin saatiin 20 % kasvu kokonaisjäykkyydessä. Tukikerroksen vaikutusta kokonaisjäykkyyteen voidaan näin ollen pitää kohtuullisen merkittävänä. Ongelmia radan jäykkyyteen aiheutuu, jos tukeutumistilanne on epätäydellinen tai raidesepeli hienonee, jolloin ratapölkyn alle voi muodostua tyhjätila. Huomionarvoista on myös se, että vaikka ratapölkyn alainen tyhjätila vähentää radan kokonaisjäykkyyttä, se ei välttämättä oleellisesti muuta tukikerroksen jäykkyyttä alkuvaiheen hienonemista lukuun ottamatta. (Peltokangas et al. 2013)

Väli- ja eristyskerroksen kokonaisjäykkyyttä kuvataan termillä kantavuus, joka voidaan määrittää esimerkiksi levykuormituskokeen tai pudotuspainolaitteen avulla. Kantavuuden määrittäminen perustuu muodonmuutosmoduulin laskemiseen ympyränmuotoisen levyn keskipisteen painumasta. Kantavuuteen vaikuttavat rakennekerrospaksuus, materiaaliominaisuudet, tiivistysaste sekä pohjamaan jäykkyys ja mittausmenetelmä. Myös ympäristötekijät, kuten vesi ja routa, vaikuttavat kantavuuteen. (Kalliainen et al. 2011)

Väli- ja eristyskerroksille on asetettu vaatimukset levykuormituskokeen toisen kuormituskerran muodonmuutosmoduulin E_2 vähimmäisarvoille. Välikerroksen keskimääräinen levykuormituskokeiden arvon olisi oltava vähintään 180 MPa ja eristyskerrokselle vähintään 160 MPa. (Kalliainen et al. 2011) Seligin ja Lin tutkimuksen mukaan väli- ja eristyskerroksien paksuudella ja moduulin arvolla on vaikutusta kokonaisjäykkyyteen. Selig ja Li kuitenkin tutkivat kokonaisjäykkyyden kehittymistä Suomen olosuhteita pienemmällä väli- ja eristyskerroksien paksuudella, jolloin paksuutena käytettiin vain 0,15 metriä tiheyden ollessa 1920 kg/m^3 . Vaihtamalla tämän kerroksen muodonmuutosmoduulin arvoa välillä 69 MPa ja 276 MPa, saatiin vajaan 10 % kasvu radan kokonaisjäykkyydessä. (Selig & Li 1994)

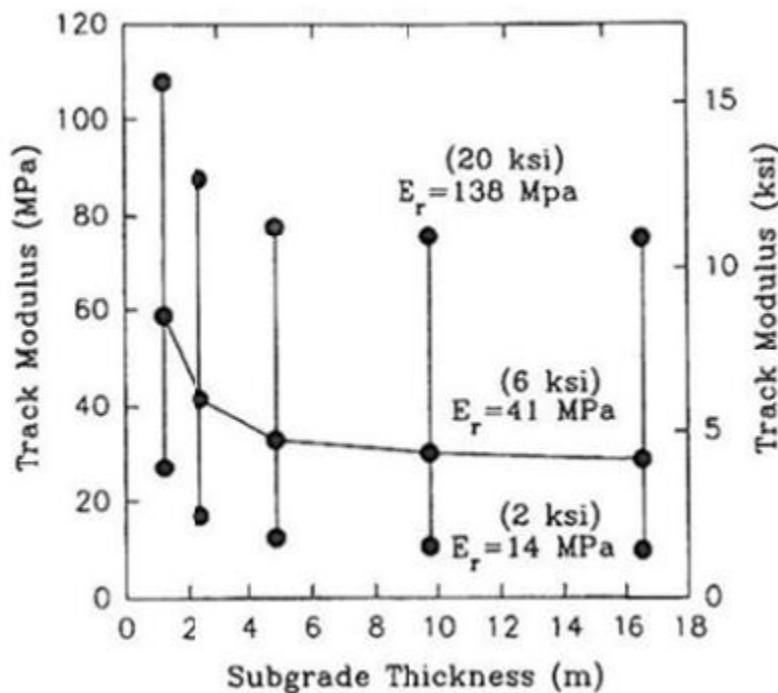
Selig ja Li tutkivat myös, miten välikerroksen ja tukikerroksen yhteenlasketun paksuuden ja moduulin muuttaminen vaikuttaa radan kokonaisjäykkyyden muodostumiseen. Tällöin tuki- ja välikerrokselle oletettiin sama moduulin arvo ja tukikerroksen paksuudeksi valittiin yhteenlaskettu kerrospaksuus. Tällöin kerrospaksuuden kasvattaminen 0,3 metristä 1,07 metriin nosti radan jäykkyyshmoduulin alkuarvosta 24 MPa arvoon 34 MPa. Tutkimuksessa vertailtiin myös yhteenlaskettujen kerrosten vaikutusta kokonaisjäykkyyteen niiden muodonmuutosmoduulien ollessa 138 MPa, 276 MPa ja 551 MPa. Tulokset on esitetty kuvassa 21. Kuvasta voidaan huomata muodonmuutosmoduulin arvolla olevan suurempi merkitys kerrospaksuuden kasvaessa. (Selig & Li 1994)



Kuva 21. Yhdistetyn tuki- ja välikerroksen paksuuden ja muodonmuutosmoduulin vaikutus radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin. Alimmat pisteet kuvaavat pienintä ja ylimmät suurinta muodonmuutosmoduulin arvoa. (Selig & Li 1994)

Seligin ja Lin tutkimuksen mukaan ehdottomasti suurin vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen on pohjamaalla ja sen ominaisuuksilla. Tämä johtuu pohjamaan ominaisuuksien hyvin suuresta vaihtelusta ja paksuudesta verrattuna muihin ratarakenteisiin. Tutkimuksessa pohjamaan moduulin arvoa vaihdeltiin välillä 14 MPa ja 140 MPa, jolloin ratamoduulin arvo kasvoi jopa kahdeksankertaiseksi. Pohjamaan tiheytenä käytettiin 1920 kg/m^3 ja Poissonin lukuna 0,35. Mallinnuksessa pohjamaan paksuuden oletettiin olevan ääretön, mikä yhdessä ohuiden tuki- ja välikerrosten kanssa saattaa liiaksi korostaa pohjamaan muodonmuutosmoduulin merkitystä. (Peltokangas et al. 2013)

Tutkimuksessa tarkasteltiin myös pohjamaan vaikutuksia ratamoduulin arvoon erilaisilla kerrospaksuuksilla. Pohjamaan paksuutta vaihdeltiin 1,2 metristä äärettömään. Paksuuden kasvaessa ratamoduulin arvo heikkenee, sillä yleensä pohjamaan moduulin arvo on ratarakenteita heikompi. Paksuuden yhä kasvaessa heikkeneminen kuitenkin tasaantuu, kuten kuvasta 22 voidaan nähdä.

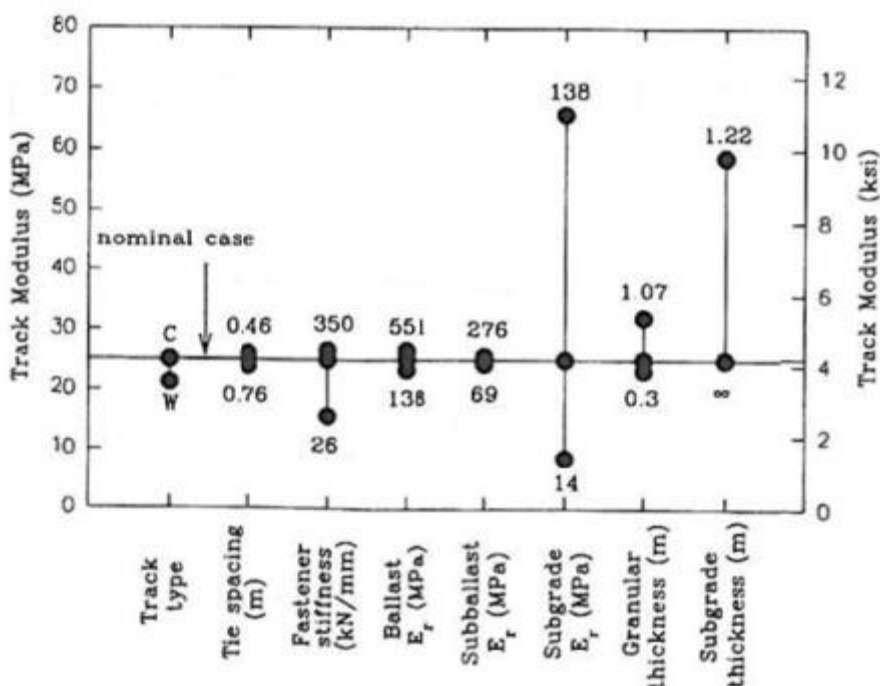


Kuva 22. Pohjamaan paksuuden ja muodonmuutosmoduulin vaikutus kokonaisjäykkyyteen. (Selig & Li 1994)

Kuvasta 22 nähdään myös, että pohjamaan muodonmuutosmoduulin arvo vaikuttaa merkittävästi ratamoduulin eli kokonaisjäykkyyden arvoon, vaikka pohjamaan kerrospaksuus kasvaakin. Pohjamaan kerrospaksuuden ollessa ohut, pohjamaan muodonmuutosmoduulin arvon vaikutus kasvaa suhteessa suuremmaksi, mitä se on suurella pohjamaan paksuudella.

Pohjamaan kannalta ongelmalliseksi muodostuvat kohdat, joissa pohjamaan jäykkyyden vaihtelu on suurta. Tämä aiheuttaa erilaisia painumia huonontaan radan geometriaa, rakennekerroksia ja matkustusmukavuutta. Hun ja Brinkmanin tutkimuksessa ”Key Factors of Subgrade Influencing Dynamic Wheel/Rail Loads at Railway Transition Zones” on rakennettu dynaaminen simulointimalli, jonka avulla voidaan tarkastella vaihtelevan pohjamaan ja radan painumien vaikutuksia ottaen huomioon myös kaluston dynaamiset ominaisuudet. Tutkimuksessa on tarkasteltu erityisesti siirtymiä pohjamaalta rumpujen päälle, lähtökohtana Rotterdamin ja Haguen välinen ratalinja Alankomaiden länsipuolella. Mallinnuksessa ratapenkereen jäykkyyden arvona käytettiin 43,01 kN/mm, jolloin jäykkyyden arvo nousi 15 metrin matkalla lopulta tierummun päällä arvoon 133,33 kN/mm. Kaluston nopeutena käytettiin alueella tyypillistä 150 km/h nopeutta. Tutkimuksen mukaan jäykkyyserot eivät itsessään aiheuta suurta vaikutusta dynaamisiin akselivoimiin, sillä suurempi kaluston dynaamiseen käyttäytymiseen vaikuttava tekijä on painumaeroilla sekä siirtymäalueiden jäykkyydellä. (Hu & Brinkman 2013)

Kuvassa 23 on yhteenvetona kaikkien rakenneosien vaikutus kokonaisjäykkyyden muodostumiseen Seligin ja Lin tutkimuksesta. Tästä nähdään pohjamaan ylivoimaisesti suurin vaikutus ratamoduulin arvon muodostumisessa, kuten myös joustavan välilevyn merkitys radan kokonaisjäykkyyden muodostumisessa, jota on kuvassa niputettu yhteen muiden kiskoa kiinnittävien osien kanssa termin Fastener stiffness alle. Merkittäviä tekijöitä ovat myös tukikerroksen ja välikerroksen paksuudet.



Kuva 23. Yhteenveto radan rakennosien jäykkyyden vaikutuksesta ratamoduulin eli kokonaisjäykkyyden muodostumisessa. (Selig & Li 1994)

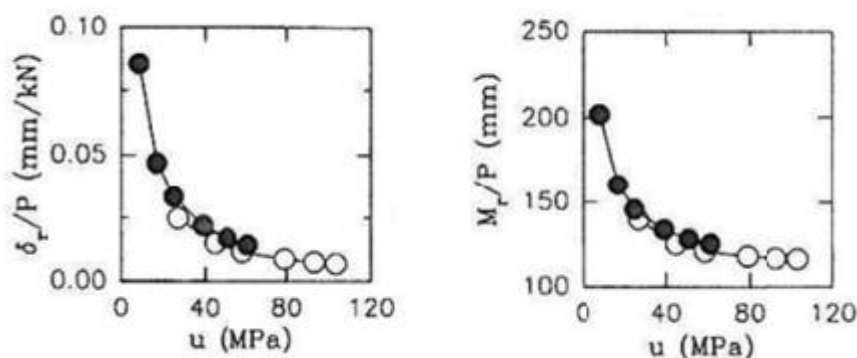
Seligin ja Lin tutkimuksen tuloksissa on otettava huomioon, että ratarakenteet eivät ole Suomelle tyypillisiä rakenteita. Näin ollen tilanne Suomessa saattaa olla hieman erilainen kuin tutkimuksessa esitetystä mallista. Vaikutusten voitaneen kuitenkin olettaa olevan hyvin samansuuntaisia ja -suuruisia. (Peltokangas et al. 2013)

4.4 Jäykkyysvaihtelun seuraukset

Radan jäykkyys vaikuttaa olennaisesti radan eri ongelmien syntyyn, sillä sen seurauksena voi syntyä painumia esimerkiksi pohjamaassa tai kiskon sidososissa, sekä kiskon vääntövoimien kasvua. Radan jäykkyydmoduulin arvoille on annettu erilaisia raja-arvoja, mutta jäykkyydmoduuli voi olla myös liian suuri. (Selig & Li 1994)

Suuri radan jäykkyys lisää dynaamisia voimia pyörä-kisko-kontaktissa, kuten myös rata-pölkyn sekä tukikerroksen välillä. Tämä voi aiheuttaa ratakomponenttien kulumista.

Myös radan jäykkyyden vaihtelu pituussuunnassa lisää radan ongelmia, sillä tällöin rataan kohdistuvat voimat ovat paikallisia ja aiheuttavat kasvavia dynaamisia kuormituksia rataan. Tämä aiheuttaa radan eriarvoista painumista pituussuunnassa, jolloin myös radan geometria heikkenee ja saattaa aiheuttaa värähtelyä kaluston ylikulkiessa. (Berggren 2009) Kuitenkin suurempi ratamoduulin arvo vähentää radan ja ratakiinnitysten vääntömomentin ja kiskon taipuman suuruutta, kuten kuvassa 24 näkyy (Selig & Li 1994)

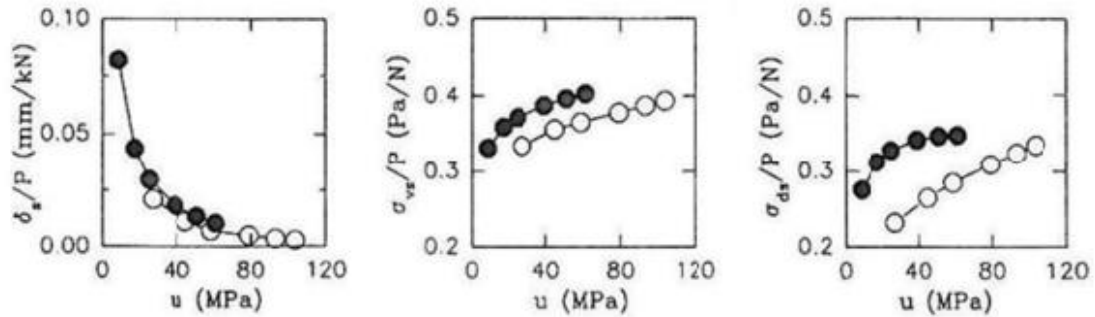


Kuva 24. Ratamoduulin vaikutus kiskon taipumaan (vas.) ja taivutusmomenttiin (oik.) kuormituksen suhteen. (Muokattu lähteestä Selig & Li 1994)

Jäykällä radalla kiskon painumat ja taivutusrasitukset pienenevät, mutta jäykkyys altistaa kiskoa tietynlaisille vioille kontaktivoimien ja pysty- ja vaakasuuntaisten voimien kasvaessa suureksi. Chaar ja Berg ovat tutkimuksessaan ”Simulation of vehicle-track interaction with flexible wheelsets, moving track models and field tests” mallintaneet radan jäykkyyden vaikuttavan pysty- ja vaakasuuntaisiin voimiin sekä esiintyviin taajuuksiin. (Chaar & Berg 2007) Pystysuuntaisten ja vaakasuuntaisten voimien taajuudet keskittyvät välille 30 – 60 Hz. Kuitenkin jäykemmällä radalla taajuudet keskittyvät korkeammille taajuuksille kuin pehmeämmällä radalla ja myös voimat ovat moninkertaiset. Jäykällä radalla muun muassa pitkän aallonpituuden korrugaatio (long pitch corrugation), vierintäväsyminen (rolling contact fatigue, RCF) ja muut tämäntyyppiset kiskoviat ovat yleisempiä, sillä jousto- ja vaimennusominaisuudet dynaamisia kuormituksia ja iskuvoimia vastaan ovat heikommat. (Iwnicki 2006)

Radan kokonaisjäykkyyden arvo vaikuttaa ratapölkyn kuormitukseen, sillä todella jäykällä radalla ratapölkkyjen kuormitukset jakautuvat pituussuuntaisesti kapeammalle alueelle kuin vähän elastisemmalla radalla. Tällöin yksittäiselle ratapölkylle sekä sen alapuoliselle tukikerrokselle kohdistuvat voimat kasvavat suuremmiksi. (Berggren 2009) Tämä voi edesauttaa betonisten ratapölkkyjen vaurioitumista. Koska raidesepelin hienonemisen kannalta olennaisinta on maksimikuormituksen suuruus keskimääräisen jännityksen sijaan, ratapölkyn alapuolisen materiaalin jäykkyyden kasvu lisää hienontumista. (Nurmikolu 2004)

Radan jäykkyyden kasvaessa pystysuuntaiset painumat vähenevät. Jos radan kokonaisjäykkyyden arvo on alle 28 MPa, painumat lisääntyvät merkittävästi. Radan jäykkyyden ollessa suurempi kuin 28 MPa, painumat vähenevät loivemmin, kuten kuvasta 25 voidaan nähdä. Taipuman ja ratamoduulin välinen korrelaatio on täysin riippumattoman pohjamaasta, eli ratamoduulin ollessa vakio sen muodostavilla radan osilla ei ole merkitystä painuman suuruuteen. (Selig & Li 1994) Selig ja Li suosittelevatkin tutkimuksissaan, että radan kokonaisjäykkyys eli ratamoduulin arvo olisi yli 28 MPa.



Kuva 25. Radan kokonaisjäykkyyden eli ratamoduulin suhde pohjamaan pinnan taipumaan (vas.), pohjamaan pinnan pystysuuntaiseen maksimijännitykseen (kesk.) ja pohjamaan pinnan suurimpaan pääjännityseroon (oik.) kuormituksen suhteen. (Muokattu lähteestä Selig & Li 1994)

Radan jäykkyyden kasvaessa suuremmaksi kasvavat myös pohjamaan kuormitukset radan alla, kuten kuvasta 25 keskimmaisesta ja oikean puolimmaisesta osasta voidaan huomata. Koska pohjamaan jäykkyys kuitenkin kasvaa usein radan kokonaisjäykkyyden eli ratamoduulin mukana, se kestää näin ollen myös suurempia kuormituksia. Tällöin maaperä kestää kasvaneet kuormitukset ja ongelmaa ei useinkaan synny. (Selig & Li 1994)

Radan jäykkyys voi vaihdella huomattavan paljon lyhyenkin matkan sisällä. Tyypillisiä nopean vaihtelevuuden alueita ovat esimerkiksi siltojen, tasoristeysten, vaihteiden ja kiskonjatkosten läheisyydessä, tai pohjamaaosuhteiden muuttuessa esimerkiksi saavuttaessa pehmeiköltä kalliroleikkaukseen. Myös tukeutumattomat ratapölkkyt voivat aiheuttaa äkkinäisiä jäykkyyksimuutoksia pituussuunnassa. Paikalliset jäykkyyserot lisäävät isku- ja dynaamisia kuormituksia, jotka nopeuttavat radan päällysosien heikentymistä. Jäykkyysero saattaa myös aiheuttaa junalle värähtelyherätteen, jolloin vaikutukset ulottuvat myös etäämmälle jäykkyyden epäjatkuvuuskohdasta. Jäykkyyseroja voidaan pienentää esimerkiksi siirtymälaatan avulla. (Luomala & Nurmikolu 2012; Peltokangas et al. 2013)

Silloista erityisen vaativia ovat terässillat, joiden kunnossapito on hankalampaa. Tällöin sillan päätyyn muodostuu herkästi muun muassa roikkuvia ratapölkkyjä. Ongelmat kasvavat nopeuden ja akselipainon kasvaessa. Tällöin ongelmaksi nousee usein nopeat jäykkyyden muutokset sekä erilaiset pysyvät painumat, joista aiheutuu radan epätasaisuuksia.

Siirtymälaatan avulla jäykkyyden muutoksia voidaan vähentää. (Luomala & Nurmikolu 2012)

4.5 Radan jäykkyyserojen mittausmenetelmät

Radan jäykkyyden määrittäminen perustuu staattisesti kuormitetun radan painumaan, jolloin radan jäykkyyttä määritettäessä mitataan radan taipumaa. Taipuman avulla voidaan selvittää laskennallisesti radan jäykkyys, jonka avulla voidaan määrittää myös ratamoduulin arvo. Yleisimmät määrittämenetelmän tyypit ovat taipumamuotoon perustuva testi, yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustesti (esimerkiksi levykuormitus) ja moniakselikuormitustesti. Radan jäykkyyden eri mittausmenetelmiä on käsitelty kattavasti Ossi Peltokankaan työssä ”Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen”. (Selig & Li 1994; Peltokangas et al. 2013)

Yleisimmin Suomessa määritellään maarakenteen kantavuus eli kokonaisjäykkyys rakenteen pinnalta levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Kantavuus on terminä hieman hankala, sillä sitä on perinteisesti käytetty kuvaamaan tierakenteen kykyä kestää liikennekuormituksia, jolloin se kuvaaisi kykyä vastustaa pysyviä muodonmuutoksia. Kantavuus perustuu juuri palautuvien muodonmuutosten määrittämiseen. Sen käyttäminen on kuitenkin todettu käytännössä hyväksi mittariksi kuormituskestävyydelle luonnonmateriaaleilla rakennetuissa tierakenteissa. Kantavuuteen vaikuttaa koko rakenteen jäykkyys, ja varsinkin ohuilla rakennekerroksilla myös pohjamaan jäykkyys. (Kalliainen et al. 2011)

Levykuormituskoe on kehitetty alun perin tierakenteen kantavuusmitoituksia varten. Laitteita on eri painoisia, jossa suuremman kuorman tuottavat ja isomman levyhalkaisijan omaavat laitteet kykenevät kuvaamaan kantavuutta suuremmilta rakennepaksumuksilta, kun taas kevyemmät ja pienemmät laitteet keskittyvät pintakerrosten rakennepaksumuksiin. Levykuormituskokeessa laitteella kuormitetaan maakerroksia staattisesti ja näin syntyneen painuman avulla arvioidaan maakerrosten kantavuutta. Keskimäärin kuormituskoe vaikuttaa rakennekerroksista riippuen vajaan metrin syvyyteen saakka. (Kalliainen et al. 2011)

Levykuormituskokeen lisäksi pudotuspainolaitteita käytetään pistemäisen kantavuuden määrittämiseen esimerkiksi teiden rakenteen parantamistarpeen selvittämiseksi. Pudotuspainolaite perustuu tietyltä korkeudelta vapaasti putoavaan painoon, jonka aiheuttamaa painumaa mitataan geofoneilla tai kiihtyvyyssantureilla. Levykuormituskokeesta poiketen painuma mitataan kuormituskeskipisteen lisäksi myös useista pisteistä pudotuspainolevyn sivulta, jolloin saadaan määritettyä eri kerrosten jäykkyydet. Pudotuspainolaite voi myös mitata painumaa vain pudotuspainolevyn keskikohdasta. Suomessa on käytössä muun muassa Loadman ja Heavy Loadman -pudotuspainolaitteet. (Kalliainen et al. 2011)

Levykuormituskokeen ja pudotuspainolaitteen lisäksi kokonaisjäykkyyttä voidaan mitata myös pistemäisesti kiihtyvyysantureilla tai siirtymäantureilla. Näin voidaan mitata joko kiskon tai pölkyn painumia. Pistemäisten mittalaitteiden avulla radan jäykkyyden mittaaminen laajemmalla alueella ei kuitenkaan onnistu, vaan siihen tarvitaan laaja-alaisesti jäykkyyttä kartoittava mittalaite. (Luomala et al. 2015)

Suomessa ei ole virallisessa käytössä menetelmää laaja-alaisen jäykkyyden mittaamiseen. Jatkuvaan jäykkyyden mittaamiseen on kehitelty tällä hetkellä tutkimuskäytössä Tampereen teknillisellä yliopistolla oleva laite, jota kutsutaan nimellä *Stiffmaister*, joka on vetokaluston perässä vedettävä mittalaite (kuva 26). Laite perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen kuormittamattomasta ja kuormitetusta radasta, jolloin painuma saadaan selville näiden kahden erotuksena. Mittaus siis suoritetaan mittakantamittauksena, jossa mittakanta on 6 metriä. Mittaustuloksien tarkkuus painumia mitatessa on käytännössä jopa 0,1 mm luokkaa eri virhelähteistä riippuen. (Luomala et al. 2015)



Kuva 26. Mittalaite *Stiffmaister*. (Luomala et al. 2015)

Jatkuvan mittalaitteen etuina on jäykkyyden poikkeamien kuten riippuvien ratapölkkyjen tai heikosti tuettujen ratapölkkyjen helpompi havaitseminen verrattuna pistemäisiin mitausmenetelmiin. Pistemäisillä menetelmillä näiden havaitseminen on lähes mahdotonta. Jatkuvalla mittalaitteella voidaan helposti kartoittaa suuren rata-alueen kokonaisjäykkyyden arvot sekä niiden vaihteluvälit. (Luomala et al. 2015)

5. RADAN EPÄTASAISUUKSIEN VAIKUTUS KALUSTON KOKEMIIN KUORMITUKSIIN

Radan epätasaisuuksien lisäksi kaluston erilaiset rakenteet vaikuttavat kaluston kokemien kuormitusten syntyyn. Esimerkiksi pyöräviat lisäävät kalustoon aiheutuvia äkillisiä dynaamisia kuormituksia ja tärinää, mikä kaluston rakenteesta riippuen välittyy eri tavoin matkustajille. Telin rakenteella on merkittävä rooli matkustajien kokeman tärinän muodostumisessa. Eri matkustajavaunutyyppeiden rakenteissa on paljon eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat kuormitusten syntyyn ja välittymiseen matkustajille.

Tässä luvussa käsitellään kaluston ja radan välistä vuorovaikutusta sekä mitkä tekijät lisäävät kaluston tärinää. Tämän jälkeen tarkastellaan kaluston radalla yleisesti kokemia rasituksia sekä tarkemmin juuri epätasaisuuksien aiheuttamaa värähtelyä. Lähemmin tarkastellaan kiihtyvyyksien erilaisia taajuuksia sekä esitellään kiihtyvyyksien raja-arvot.

5.1 Kaluston ja radan vuorovaikutus

Kaluston ja radan vuorovaikutukseen vaikuttaa moni tekijä aiemmin esiteltyjen radan jäykkyysvaihteluiden ja epätasaisuuksien lisäksi. Radalla kulkevan kaluston ominaisuuksilla, erityisesti kulkunopeudella ja akselipainolla, on suuri merkitys rataan kohdistuviin kuormituksiin. Radan epätasaisuuksien ja jäykkyysvaihteluiden lisäksi myös radan geometria vaikuttaa suuresti syntyviin vuorovaikutuksiin. Radan geometrian erilaisia poikkeamia on käsitelty luvussa 2.1.

5.1.1 Akselipaino ja pyöräkuorma

Akselipaino koostuu junan massasta jaettuna akseleille, mistä aiheutuu junan rataa kohdistama pystysuuntainen staattinen kuormitus. Kokonaisuudessaan pystysuuntainen kuormitus koostuu staattisesta eli paikallaan seisovan junan aiheuttamasta kuormituksesta, sekä dynaamisesta eli liikkuvan junan aiheuttamista kuormituksista. (Ratahallintokeskus 1995) Dynaamista ja staattista kuormitusta ja niiden jakautumista ratakerroksissa on käsitelty luvussa 3.1. ja 3.2.

Suomessa eri rataosuuksille on annettu rataluokitus, jonka perusteella määräytyy myös sallittu akselipaino ja pyöräkuorma (taulukko 9). Rataluokan määrittelemiseen vaikuttaa radan kiskoprofiili sekä tukikerroksen materiaali. Radat jaetaan yleensä luokkiin rataositain, jolloin huomioidaan myös radan muu rakenne, geometria ja kunto sekä muut tekijät. Suomen rataluokat on esitelty Liikenneviraston julkaisussa ”Rataverkon kuvaus 1.7.2014”. (Ratahallintokeskus 1995)

Taulukko 9. Rataluokat ja niitä vastaavat sallitut akselipainot sekä henkilövaunun suurin sallittu nopeus. (muokattu lähteestä Ratahallintokeskus 1995 ja Ratahallintokeskus 2002)

| Rataluokka | Kiskotus | Tukikerros | Sallittu akseli-paino (t) | Henkilövaunun suurin sallittu nopeus (km/h) akselipainon ollessa 16 t | Dynaaminen pyörä-kuorma Q max (kN) |
|---------------------------------|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---|------------------------------------|
| A | K30, K33 | Sora, hieno raidesepeli tai vastaava | 16 | 70 | 100 |
| B ₁ | K43, UIC54 | Sora, hieno raidesepeli tai vastaava | 22,5 | 100 | 140 - 150 |
| B ₂ | K43, K60 | Karkea raidesepeli | 22,5 | 120 | 170 - 185 |
| C ₁ , C ₂ | UIC54, UIC60 | Karkea raidesepeli | 22,5 | ≥ 120 | 200 |

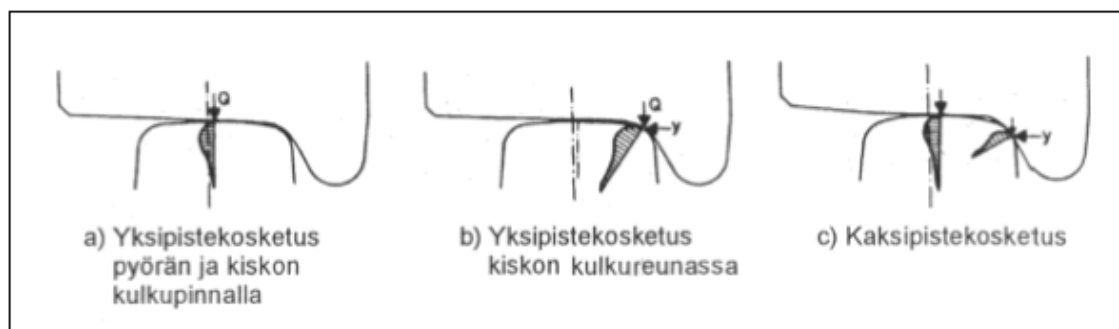
Staattinen kuormitus aiheutuu kaluston massasta, mutta kaluston massa ei välttämättä jakaudu tasan akseleille. Esimerkiksi tavaravaunu on voitu lastata epätasaisesti, jolloin kuormituskin jakautuu epätasaisesti akseleille ja sitä kautta pyörille. Massan aiheuttama kuormitus välittyy kalustolta kiskoille pyörien ja kiskon välisen kontaktin kautta. Kiskoille välittyvään kuormitukseen vaikuttaa telien akseliväli, telikeskiöväli sekä peräkäisten vaunujen akselien ja telien etäisyydet toisistaan. Epäjatkovana tuleva kuormitus väsyttää ratarakenteita aiheuttaen herkästi epätasaisuuksia. (Hakulinen et al. 2012)

Rataan kehittyneet epätasaisuudet ja jäykkyysvaihtelut sekä geometrian vaihtelu herättävät junakaluston värähtelemään, jolloin syntyy dynaamisia kuormituksia. Dynaamisia kuormituksia voi syntyä myös värähtelemättömään kalustoon esimerkiksi kaarresäteen ja kallistuksen muutoksissa. (Iwnicki 2006) Radan kallistuksen ja nopeuden muutoksesta aiheutuvat poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet voivat toimia impulsimaisena herätteenä kaluston värähtelylle, jolloin pyöräkuorma voi hetkellisesti keventyä. Äkillinen poikittaissuuntainen poikkeama, kuten esimerkiksi nuolikorkeuspoikkeama, voi myös johtaa kaluston värähtelyyn ja epästabiiliin kulkuun. (Hakulinen et al. 2012)

5.1.2 Pyörän ja kiskon vuorovaikutus

Junan massan aiheuttama kuormitus välittyy kalustolta kiskoille pyörien ja kiskon välisen kontaktin kautta. Kontaktivoimien jakautumiseen vaikuttaa muun muassa pyörä- ja kiskoprofiilit, jotka voivat vaihdella paljonkin. Myös radan epätasaisuudet, geometria ja junan värähtely vaikuttavat kontaktipinnan muodostumiseen. (Hakulinen et al. 2012) Pyörälle on määritetty Liikenteen turvallisuusviraston eli Trafín toimesta ohjearvoja esimerkiksi pyörän kehän leveydelle sekä laipan korkeudelle. (Trafí 2014)

Pyörä-kisko-kontakti tapahtuu joko yhden tai kahden pisteen kautta kosketuspinnan ollessa ovaalin muotoinen. (Lahti 2008) Yhden pisteen kosketus esiintyy suoralla sekä kaarteiden ulkokiskolla, jolloin kosketus voi olla kiskon kulkupinnalla tai kulkureunalla (kuva 27 a ja b). Kaksipistekosketus voi muodostua, kun vaunu ei ohjautu kiskolla riittävästi esimerkiksi kaarteissa (kuva 27 c). (Esveld 2001) Kuvan 27 b:n kaltainen tilanne on tyyppillinen tietyllä tavalla kuluneen pyörän ja pyöristyneen kiskonpään välillä. Tällainen kosketusmuoto kuluttaa pyörää nopeasti kiskon muotoa mukailevaksi. Normaalisti kontaktiellipsin pidempi halkaisija on vain 15 mm, mutta pyörän muotoutuessa hyvin kiskon muotoa vastaavaksi niiden välille voi kehittyä myös laajempialainen kontakti. (Iwnicki 2006)



Kuva 27. Pyörän ja kiskon välinen kontakti eri tilanteissa. (Korkeamäki 2011)

Kiskojen ja pyörien vaihtelevat profiilit luovat kontaktipintoihin eroavaisuuksia. Kiskot ja pyörät myös kuluvat käytössä, minkä huomioon ottaminen onkin tärkeää muodostuvia kontaktipintoja tarkastellessa. Näin ollen lyhyelläkin ratapätkällä kiskoprofiili voi vaihdella. Myös jokaiselle pyörälle muodostuu oma profiilinsa. Tavallisimmin pyöräprofiilit kuluvat kiskoprofiilien muotoon, eli kuluminen tapahtuu laipan juuren osalta. Tämän myötä pyörän ja kiskon vuorovaikutus muuttuu, mikä vaikuttaa kaluston käyttäytymiseen sekä sen myötä rataa kohdistuviin kuormituksiin. (Hakulinen et al. 2012)

Kiskon ja pyörän kosketuskohtien sijaintiin ja kosketuskulmiin vaikuttaa myös oleellisesti raideleveys, pyöräkerran raideleveysmitta ja kiskon kallistus. Raiteen raideleveys ja pyöräkerran raideleveysmitta määrittelevät niin kutsutun raidevälyksen suuruuden, joka kuvaa pyörän sivusuuntaista liikkumatilaa kiskoilla. Nimellinen raidevälyksen suuruus Suomen rataverkolla on 14 mm. Raidevälyys vaikuttaa suoralla radalla ja kaarteissa kaluston kulun tasaisuuteen, kaarrevastukseen ja kiskoon sekä raiteeseen kohdistuviin voimiin. Raidevälyksen ollessa liian kapea nopeuteen nähden saavuttaa pyöräkerta laippakosketuksia, mikä johtaa kaluston poikittaissuuntaiseen heilahteluun. Tällä voi olla merkittävä vaikutus matkustusmukavuuteen. (Liikennevirasto 2010) Laippakosketus voi syntyä myös raiteen ja kiskon vääränlaisista kallistuksista. (Korkeamäki 2011)

Kiskon ja pyörän kontaktiin kuuluu myös oleellisesti tehollinen kartiokkuus. Tehollinen kartiokkuus on laskennallinen suure, joka lasketaan pyöräkerran ja raiteen todellisista profiileista ja keskinäisistä asennoista eli käytännössä sivuttaissiirtymän ja sitä vastaavan

pyörien vierintäsäde-eron avulla. Näin ollen pyöräkerran tehollinen kartiokkuus myös muuttuu ajan myötä pyöräkerran ja kiskojen kuluessa. (Hakulinen et al. 2012) Pyörä-kiskoprofiilin kuluessa vaunu voi menettää kykynsä ohjautua ilman laippakosketusta. (Sawley et al. 2005)

Suuri kartiokkuuden arvo aiheuttaa epästabiilia kulkua suoralla radalla, kun taas liian pieni kartiokkuus johtaa pyöräkerran ohjautuvuuden pienenemiseen erityisesti kaarteissa. Ohjautuvuuden huonontuessa laippakosketukset lisääntyvät, mikä näin ollen voi johtaa myös epästabiiliin kulkuun. Pyöräkerran kartiokkuudella onkin suuri vaikutus vaunun kaarreominaisuuksiin, ajovakauteen sekä kontaktipinta-alan suuruuteen. (Liikennevirasto 2010)

5.1.3 Pyöräviat

Yleisimmät pyörissä esiintyvät viat ovat kulutuspinnan lohkeilu, lovet ja monikulmaisuus. Tämä aiheuttaa raiteeseen sekä liikennöivään kalustoon normaalia suurempia voimia, sekä lisää esimerkiksi kiskovikojen riskiä. Pyörävioista ehkä merkittävin on lovipyörä, joka voi pahimmillaan aiheuttaa kaluston suistumisen radalta. Lisäksi pyörän virheelliset muodot lisäävät radan ja kaluston kokemia dynaamisia kuormituksia, jotka ovat moninkertaisia staattisiin kuormituksiin nähden. Myös melu ja värinä voivat lisääntyä huomattavastikin. (Lahti 2008) Lovipyörän aiheuttama kuormitus kiskolle voi olla jopa $400 - 800 \text{ N/mm}^2$ suurempi kuin tavallisen pyörän kuormitus. (Lichtberger 2005)

Lovipyörät syntyvät lukkojarrutuksessa tai jarrujen jäädessä päälle liikkeelle lähdössä, jolloin kisko kuluttaa pyörän kaaren tasaiseksi. Lukkojarrutukset ovat tyypillisimpiä kiskon ja pyörän välisen kitkan ollessa pieni, esimerkiksi syksyllä lehtien liukastamilla kiskoilla. Myös esimerkiksi radan geometria ja veturinkuljettajan virheellinen toiminta voi lisätä lovipyörän riskiä. (Tanabe et al. 2004; Lahti 2008)

Tavaravaunuissa esiintyy lovipyöriä matkustajavaunuja useammin niiden alkeellisemmän jarrujärjestelmän takia. Alkeellinen järjestelmä huomioi heikosti sen hetkisen akselipainon jarrutuksia tehdessä, vaikka kuormatun vaunun paino verrattuna kuormaamattomaan voi olla moninkertainen. Talvella tällaiset jarrut voivat jäätä, jolloin joku akseli ei pyöri junan edetessä ja pyörä hioutuu nopeasti sileäksi. (Lahti 2008)

Syntyneet lovet pyöristyvät ajossa, mutta sitä ennen pyöristymättömän loven reunat aiheuttavat lisääntyneitä iskumaisia dynaamisia kuormituksia radalle ja kalustolle. Vaikka silmämääräisesti lovi katoaa pyörästä, se jättää pyörään säteittäisheittoa ja materiaalivian. Pyörään jäänyt säteittäisheitto altistaa radan ja kaluston edelleen dynaamisille kuormituksille, vaikka loven kulmat ovat pyöristyneet. (Lahti 2008)

Pyörän pinta voi myös hilseillä tai kuoriutua, mitkä eroavat toisistaan lähinnä irtoavien partikkeleiden koolla. Pyörän pinnan irtoilu johtuu lähes aina käytön aikana syntyneestä

pyörän pinnan virheestä, mutta myös valmistusvaiheessa syntynyt virhe on mahdollinen. Hilseilyyn johtaneet viat syntyvät usein pyörän sutiessa tai liukuessa hitaasti jarrutuksessa, jolloin pintamateriaalia irtoaa kulutuksen seurauksena. Hilseily on tyypillisempää kevyillä akselikuormilla. Varsinkin pinnan kuoriutuminen on 2008 tehdyn tutkimuksen mukaan Suomessa varsin yleistä. (Lahti 2008)

Pyörien kulutuspinta voi myös kulua monikulmaiseksi tai aaltoilevaksi vaikeuttaen pyörän sujuvaa pyörimistä. Pyörän aaltoilua esiintyy kulutuspinnan ja pölkkejarrun termomekaanisen vuorovaikutuksen seurauksena. Monikulmaisia pyöriä eli jaksottaista epäpyöreyttä esiintyy pääasiassa vetävissä pyörissä ja levyjarruilla varustetuilla akseleilla. Jakson pituus vaihtelee ja sen seurauksena pyörä voi vaikuttaa epäkeskiseltä tai ovaalilta. (Lahti 2008)

5.2 Kaluston osat

Tässä luvussa käsitellään kaluston osat pääpiirteittäin keskittyen matkustajavaunuissa esiintyviin tyypillisiin ratkaisuihin. Vaunun telillä on merkittävä vaikutus matkustajan tuntemaan tärinän muodostumisessa, sillä teli toimii välikappaleena radan ja vaunun välillä kuormitusten välittäjänä. Telin kuormitusten välittäminen tapahtuu jousien ja vaimentimien avulla, jotka ottavat kuormitukset vastaan.

5.2.1 Teli

Pyörän kautta dynaamiset kuormitukset välittyvät lopulta teliin. Telin tehtävänä onkin stabiloida vaunun ajoa suoralla ja kaarteisella radalla, vähentää pientä radan epätasaisuuksista johtuvaa värähtelyä ja näin parantaa matkustusmukavuutta sekä estää kiskon epätasaisuuksien pahentumista. Teli siis toimii pyörien ja vaunun välillä vakauttajana molempiin suuntiin. (Okamoto 1998)

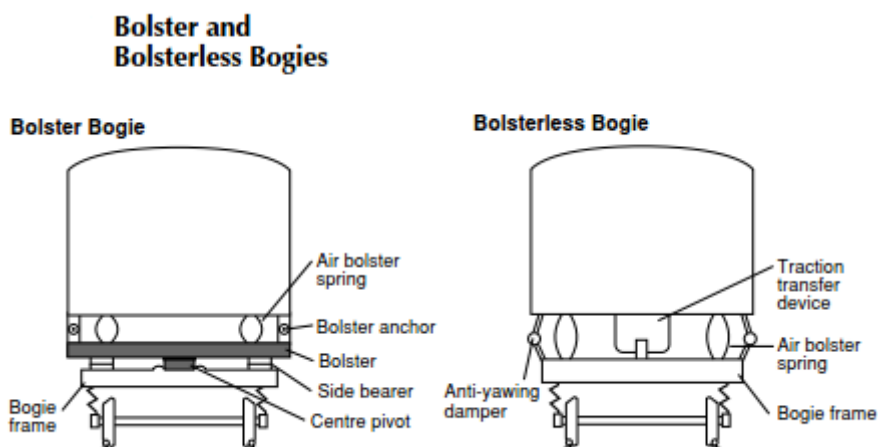
Telin voi jakaa eri tyyppeihin akselimäärän perusteella. Tyypillisin akselimäärä on kaksi akselia eli kaksi pyöräkertaa per teli, mutta myös yksiakselisia ja kolmiakselisia telejä on. Kaksiakselinen teli on kohtuullisen yksinkertainen, mutta kahden akselin ansiosta se ei välitä jokaista radan epätasaisuutta eteenpäin yhtä herkästi kuin yksiakselinen teli. Kolmiakselinen telirakenne on jo monimutkaisempi ja vaikuttaa junan kulkuun, joten sitä ei pääasiassa käytetä matkustusvaunuissa. (Okamoto 1998)

Myös telin niveltyminen jakaa niitä eri tyyppeihin, sillä teli voi olla nivelöity tai niveltymätön. Niveltyvät telit sijoitetaan yleensä niin, että yhtä vaunua tukee kaksi teliä. Niveltyvät telit taas sijoitetaan niin, että teli sijaitsee aina vaunujen välissä kannatellen edellä kulkevan vaunun takaosaa ja takana kulkevan vaunun etuosaa. Niveltyviä telejä käytetään harvemmin niiden hankalamman muodon, ylläpidon ja kasvaneen akselipainon takia. Erityisesti matkustajavaunuilla niveltuvien telien käytöstä on kuitenkin hyötyä,

sillä ne parantavat matkustusmukavuutta ja vähentävät matkustajille kuuluvan kiskome-lun määrää. (Okamoto 1998)

Tyypillisesti Suomessa junakalustossa on telin ja vaunun välissä keskipalkki (bolster, kuva 29), mutta 1980-luvulla kehitettiin myös keskipalkittomia telejä (Hakulinen et al. 2012). Koska telin tehtävänä on vastustaa kovassa vauhdissa tapahtuvaa heiluntaa (hunting), sen kiertojäykkyyden on oltava suuri. Siitä huolimatta kaarteissa telin tulee kääntyä vaunun mukana. Tämän myötä keskipalkillisen telin telikeskiö (centre pivot) kääntyy vaunun mukana, mutta vaunun ja telin keskipalkin sivujousitukset vastustavat liiallista kääntyilyä. (Okamoto 1998)

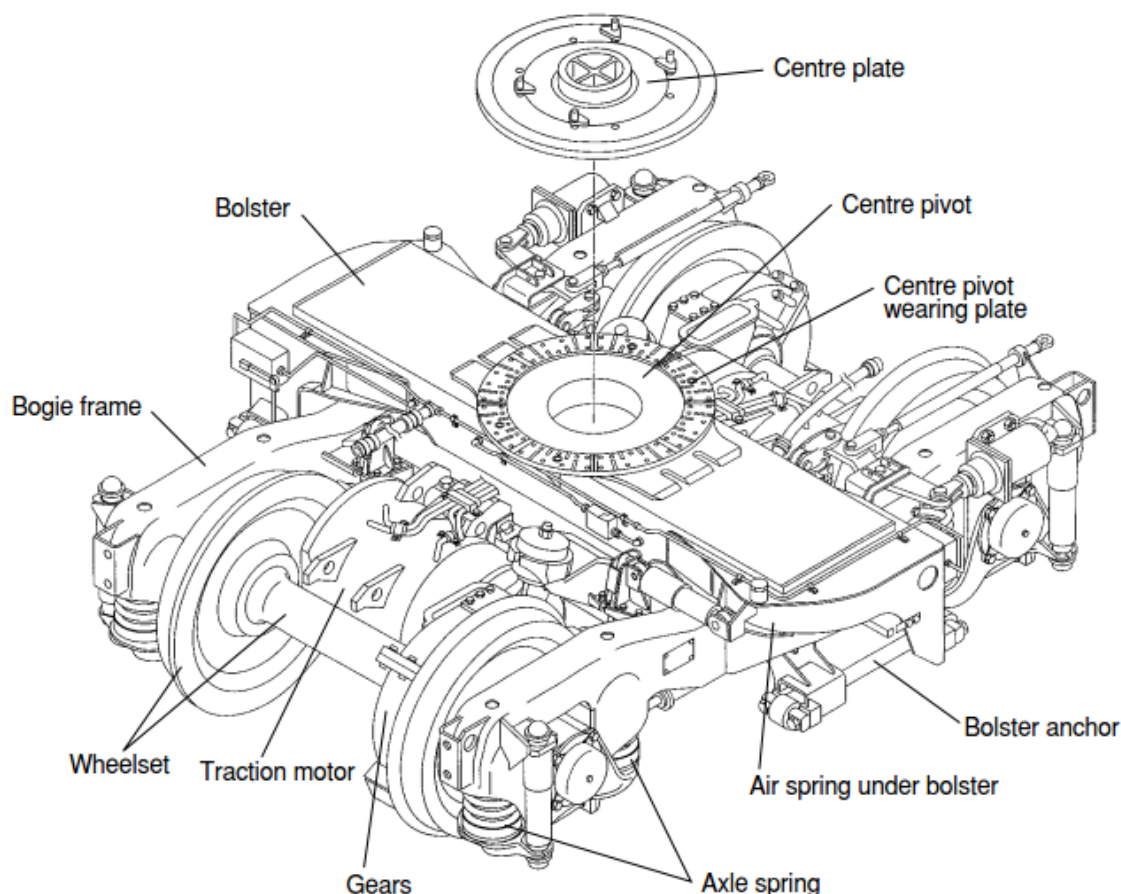
Maailmalla yleistyneet keskipalkittomat telit (bolsterless bogie, kuva 28) toimivat kahden sekundäärijousen avulla estäen pystysuuntaisen jäykkyyden avulla kääntyilyn. Pystyak-selin ympäri tapahtuvaa rotaatiota (yaw) estetään oikein suunnatuin vaimentimin (anti-yaw-damper). Vaimentimien avulla liiallinen heilunta saadaan estettyä helpommin kuin sivutukien avulla. (Okamoto 1998)



Kuva 28. Vasemmalla keskipalkillinen teli ja oikealla keskipalkiton teli, jonka rakenne on yksinkertaisempi. (Muokattu lähteestä Okamoto 1998)

Vaunun ja telin välisen kiinnityksen tulisi mahdollistaa telin kääntyminen kaarteissa vau-nun mukana ja voimien välittyminen vaunusta teliin sekä kontrolloida poikkisuuntaisia voimia ja auttaa telin stabiiliteetin säilyttämisessä. Teli kiinnitetään vaunuun usein teli-keskiön avulla, mutta on myös muunlaisia ratkaisuja. (Iwnicki 2006)

Telikeskiö on yleensä levymäinen kiinnityskohta telin keskellä ja siihen kuuluu myös jousia tai muita joustavia osia. Suurin osa telin ja vaunun kuormituksista välittyy telikes-kiön kautta. Telikeskiöitä on erilaisia ja niitä käytetään sekä matkustusvaunuissa että ta-varavaunuissa, jossa ne sijaitsevat keskipalkin ja vaunun välillä. Keskiö voi myös vastus-taa erisuuntaisia vaunun kiertoliikkeitä. (Iwnicki 2006) Kuvassa 29 on telikeskiön sisäl-tävä ilmajousitettu teli, joka on tyypillinen yksinkertainen keskipalkillinen teli. (Okamoto 1998)



Kuva 29. Keskipalkillinen ilmajousitettu teli, jossa on käytetty keskilevyä (centre plate). (Okamoto 1998)

Keskipalkittomassa telissä ei voida käyttää telikeskiön tyyppistä kiinnitystä vaunurungon ja telin välissä, koska ilman keskipalkkia jouset kiinnittyvät suoraan vaunurunkoon. Tällöin telikeskiön sijaan kaarteissa tarvittava kiertoliike tapahtuu näiden jousien avulla. Tällöin junan tullessa kaarteeseen, jouset poikkeavat pitkittäissuuntaisesta tasapainoasemastaan mahdollistaen telin liikkeen vaunun mukana. Tämä toimii myös ilmajousitetulla telillä, kun pitkittäissuuntaiset voimat välittyvät muiden rakenteiden, kuten vetotangon, kautta. (Iwnicki 2006)

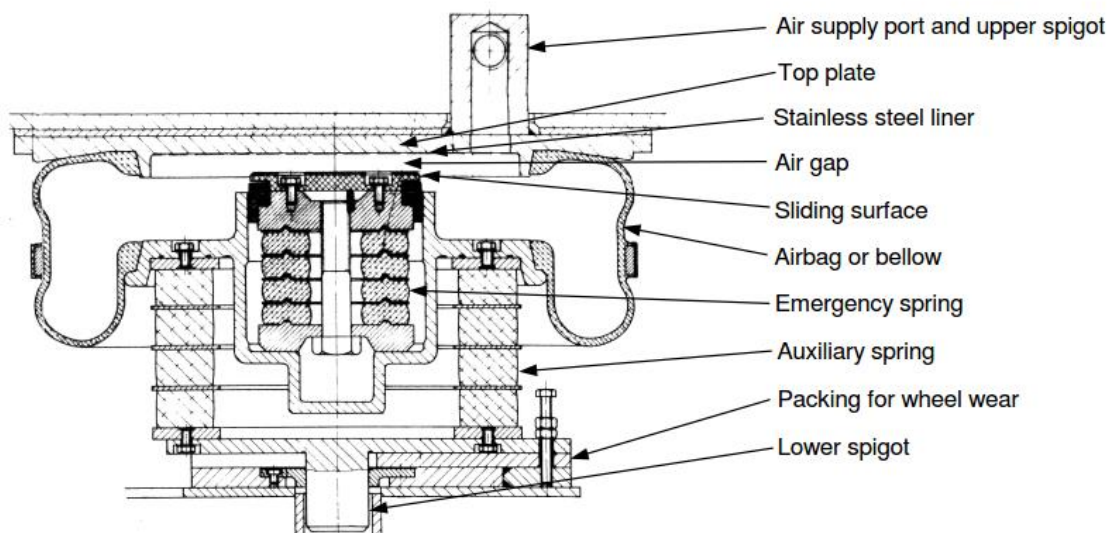
5.2.2 Jousitus ja vaimennus

Kaluston osien kiinnitys hoidetaan elastisilla elementeillä kuten jousilla, vaimentimilla sekä muilla komponenteilla kuten jouston rajoittimilla (bump stop). Jousituksella ja vaimennuksella on tärkeä rooli vaunurungon tukemisessa, joustavana elementtinä kaarteissa, nopeiden taajuuksien tärinöiden suodattamisessa ja kuormitusten välittämisen tasapuolittamisessa esimerkiksi kaikille pyörille. (Solanki 2013)

Yleensä kiinnitykset koostuvat kahdesta osasta: primääri- ja sekundäärijousituksesta. Primäärijousitus kiinnittää pyöräkerrat teliin ja sekundäärijousitus kiinnittää telin vaunurunkoon. Joissain tavaravaunuissa, kuten Suomessakin yleisissä telittiömissä raakapuuvauunuissa, voidaan käyttää myös yksitasoista kiinnitystä. (Iwnicki 2006)

Jousityyppejä on monia erilaisia, mutta kierrejousi on kaikista suosituin. Kierrejouset tehdään yleensä teräksestä ja ne ovat kestäviä ja edullisia ratkaisuja, mutta niiden vaimenusominaisuudet ovat heikot. Kierrejousia voidaan käyttää esimerkiksi vaunun ja telin välissä pääjousituksena. Tavallisen kierrejousen lisäksi käytössä voi olla esimerkiksi vääntäjousia, ilmajousia ja kumia sisältäviä jousiratkaisuja. Vääntäjousia käytetään tyyppillisesti kallistuksen vaimentimissa (anti-roll bar) ja kumia sisältävillä jousiratkaisuilla on myös hyvät vaimenusominaisuudet. (Iwnicki 2006)

Ilmajouset koostuvat alustasta, kumisäiliöstä ja sen täyttävästä paineistetusta kaasusta, joka yleisimmin on ilmaa (kuva 30). Ilmajousen etuja ovat sen pieni massa, hyvä tärinän ja äänen vaimennus sekä sopeutuminen vaihtelevaan akselipainoon. Tämän takia niitä käytetään paljon matkustajavaunuissa, sillä ne parantavat matkustusmukavuutta huomattavasti. Yleensä ilmajousen sisään on rakennettu jousisysteemi ilmajousen tyhjentymisen varalle, eli ns. hätäjousi (emergency spring). (Iwnicki 2006)



Kuva 30. Ilmajousen perusrakenne. (Vampire Pro 2015)

Ilmajouset sallivat hyvin vaakasuuntaisia sivuttaissiirtymiä kaarteissa, jolloin ilmajouset korvaavat keskipalkillisen telin keskipisteen kääntyvän laatan. Tällöin ilmajousen lisäksi tarvitaan anti-yaw-vaimentimet, jotka estävät suoralla radalla ajonaikaisen poikittais-suuntaisen heilumisen (hunting). (Okamoto 1998)

Kaluston vaimennus toteutetaan usein joko viskoosiin tai kitkaan perustuvien vaimentimien avulla. Kitkavaimennin perustuu kahden kappaleen väliseen kitkaan, jolloin se vastustaa liikettä liukupintojensa suuntiin. Vaimennus voi olla riippuvainen vaunun massasta tai massasta riippumaton vakio. Viskoosivaimentimessa taas kahden kappaleen välille on laitettu viskoosista ainetta tai hydraulinen vaimennin. Myös elastisia esimerkiksi kumista valmistettuja vaimentimia on käytössä. (Iwnicki 2006)

Kitkavaimentimet toteutetaan yleensä integroituna esimerkiksi jouseen, kun taas hydrauliset teleskooppivaimentimet toimivat usein itsenäisesti. Kitkavaimentimet ovat edullisia ja helppohoitaisia, jonka johdosta ne ovat yleisiä varsinkin tavaravaunuissa. Teleskooppivaimentimet taas ovat autonomisia, ympäristöltä suojattuja ja niitä voi asentaa myös erilaisiin kulmiin, mikä onkin niiden suurin etu kitkavaimentimiin nähden. Ne ovat myös toiminnaltaan kitkavaimentimia varmempia ja täten usein käytössä matkustajavaunuissa. (Iwnicki 2006)

Kalustossa käytetään erilaisia liikkeenrajoittimia (constraint) sekä joustonrajoittimia (bump stop) poikittaisiin ja pituussuuntaisiin voimiin. Liikkeenrajoittimet voivat esimerkiksi estää pyörän pituussuuntaista liikettä suhteessa teliin junan jarruttaessa tai kiihdyttäessä. Kalustossa voidaan käyttää vetotankoja (traction rod), jotka välittävät pitkittäis-suuntaisia voimia primääri- tai sekundäärijousituksen apuna. Vetotanko on kiinnitetty kalustoon kummastakin päästä holkilla. (Iwnicki 2006)

5.2.3 Pyöräkerta ja sen kiinnitys

Pyöräkerta koostuu pyöristä ja niitä yhdistävästä akselistä. Pyöräkertojen ja niitä muuhun kalustoon yhdistävän kiinnityksen tarkoitus on kannatella kalustoa, ohjata kaluston liik-kumista varsinkin kaarteissa ja vaihteissa sekä välittää veto ja jarrutusvoimat kiskoihin kaluston kulun hidastamiseksi tai kiihdyttämiseksi. Pyöräkerran rakenteeseen vaikuttaa käytetty kalusto, jarrutussysteemi ja mahdolliset korkeita taajuuksia vaimentavat kumilevyllä pehmenneet systeemit. (Iwnicki 2006)

Pyörät ovat hyvin tärkeitä junan kiskoilla pysymisen kannalta, sillä vika niissä saattaa johtaa vaunun suistumiseen radalta. Pyörä koostuu kulkupinnasta (tyre), pyörän keski-osasta (disc) sekä näitä liittävästä väliosasta (hub). Pyörät voidaan jakaa tavallisiin kiinteisiin pyöriin, erillisen irrotettavan kulkupinnan omaaviin pyöriin ja korkeita tärinöitä suodattaviin kumilevyn kulkupinnan ja väliosan välillä omaaviin pyöriin. Myös pyörien profiili vaihtelee ja väliosa voi muotoutua eri tavoin. (Iwnicki 2006) Käytössä pyörän profiili ja läpimitta saattavat muuttua, mikä voi vaikuttaa niiden kulkuun merkittävästi. Pyörät ovat erittäin herkkiä massakeskipisteen epätasapainolle, jolloin niistä aiheutuu herkästi tärinää muuhun kalustoon. (Okamoto 1998)

Pyöräkertojen eroja tarkastellessa nousee esiin kolme merkittävintä tekijää: pyörän akselitapin ulkonevuus, pyöräkerran jarrulevyjen sijainti ja pyöräkertojen symmetrisyys. Jarrulevy voidaan sijoittaa pyöräkerran pyörään tai erillisenä osana akseliin. Pyöräkertojen symmetrisyyteen taas vaikuttaa eri apulaitteiden sijoittelu akselistossa. Myös pyörien profiilit eroavat kuluneina toisistaan jonkin verran. (Iwnicki 2006)

Pyörän akselit ovat yleensä umpinaisia, mutta joskus myös onttoja akseleita käytetään vaunun massan vähentämiseksi. Keskipalkittomiin teleihin niitä voidaan käyttää jousittamattoman massan pienentämiseksi. (Okamoto 1998)

Pyörän teliin kiinnittävä laakeripesä (axle box) on tärkeä osa telin rakennetta. Se kiinnittää pyörän teliin välittäen suuria kuormituksia pyöriltä telille ja mahdollistaa pyörän pyörimisen. Laakeripesä vaikuttaa telin ajonaikaiseen käyttäytymiseen, ajomukavuuteen ja jäykkyYTEEN. Laakeripesän tyyppi ja varsinkin kiinnitystapa teliin vaihtelee paljon. Tyypillisesti laakeripesä kiinnittyy teliin yhden tai useamman jousen sekä vaimentimen avulla. (Okamoto 1998; Iwnicki 2006)

5.2.4 Idän liikenne

Idästä tuleva liikenne koostuu pääsääntöisesti IVY-maiden vaunuista, jotka noudattelevat suurilta osin venäläistä standardia poiketen suomalaisista vaunuista. (Korkeamäki 2011) Pääasiassa liikenne koostuu tavaravaunuista, joista suuri osa on säiliövaunuja. Venäläisen kaluston määrä Suomen rataverkolla on jatkuvasti noin 3000 – 4000 vaunullista, joten niiden kululla on vaikutusta Suomen rataverkon kuntoon. Myös kaukoliikenteen matkustajavirratt itään ovat olleet kasvusuunnassa. (Nurmikolu 2015)

Venäjän liikenteessä on tyypillistä käyttää kolmiosaista teliä tyyppimerkinnältään 18–100 tavaraliikenteen vaunuissa, joita Suomenkin puolella pääasiassa liikkuu. Tällainen teli koostuu keskipalkista (bolster) sekä kahdesta telin runko-osasta kummallakin puolella keskipalkkia. Keskipalkki on kiinnitetty molemmilta sivuilta sivupalkkeihin, mikä mahdollistaa telin kahden runko-osan päiden eriaikaisen pystysuuntaisen liikkeen esimerkiksi radan epätasaisuuden takia. (Iwnicki 2006) Koska pyöräkertojen ja telin välillä ei ole enää toista jousitusta, on telin jousittamaton massa suuri. (Korkeamäki 2011)

Telin jousielementin huono puoli on sen muutoskyvyttömyys, jolloin jäykkyys pysyy vakiona kuormituksesta riippumatta. Jousitus on suunniteltu suurelle kuormitukselle, jolloin ongelmia esiintyy erityisesti kuormaamattomalla vaunulla. Liian jäykkä jousitus aiheuttaa telin huonot ajo-ominaisuudet sekä kasvaneen suistumisen riskin. (Iwnicki 2006) Kolmiosaisten telin suuresta jousittamattomasta massasta aiheutuu suuremmat iskuvoimat esimerkiksi mahdollisen lovipyörän tapauksessa. Tämä lyhentää radan rakenteiden käyttöikää. (Korkeamäki 2011)

Myös kolmiosaisen telin kaarreominaisuuksissa on puutoksia. Pyörien vierintäsäde-erosta johtuva telin pieni palauttamisvoima aiheuttaa sen, että telin oikaisukyky kärsii siirryttäessä kaarteelta suoralle. Myös sivuttaissuuntainen jäykkyys on suuri, jolloin vaunu tarvitsee suuremman ohjaavan voiman kaarteessa kääntyäkseen. Tämä kasvattaa kiskon ja pyörän välisiä voimia, mikä voi lisätä kiskon kulumista. (Iwnicki 2006)

5.3 Kalustoon yleisesti vaikuttavat voimat

Junakaluston ajodynamiikkaan vaikuttavat kaluston kiihdytykset, rullaukset, jarrutukset, ajokilometrit sekä vaihteleva käyttäytyminen esimerkiksi epätasaisuuksien takia. Liik-keeseen vaikuttavat myös pyörän kehällä tapahtuvat vetovoimat ja liikettä vastustavat voimat, jotka välittyvät koko kalustoon. (Liikennevirasto 2010) Kalustoon vaikuttavat voimat aiheuttavat kaluston värähtelyä ja rasitusta. Kalustossa esiintyvät erilaiset voimat on esitelty tässä luvussa.

5.3.1 Vastusvoimat

Kalustosta kohdistuu rataa monenlaisia kuormituksia. Veto- ja jarrutusvoimat ovat ra-dan pitkittäissuuntaisia voimia, joihin vaikuttavat pyörä-kisko-kontaktin kitkakerroin ja mahdollinen hiekoitus tai kiskon voitelu. Kaarteessa veto- ja jarrutusvoimat aiheuttavat kaluston sisäisiä kuormituksia, jotka voivat aiheuttaa myös sivusuuntaisia voimakom-ponentteja. (Hakulinen et al. 2012)

Kaluston vetovoima lähtee liikkeelle veturista. Vetovoima on suurimmillaan nopeuden ollessa pieni ja siihen vaikuttaa merkittävästi kaluston pyörä-kisko-kontaktin kitka. Kit-kaa voidaan nostaa hiekoituksella tai vähentää voiteluaineilla ja siihen vaikuttavat myös kiskon pinnan epäpuhtaudet sekä lumi ja jää talvisin. Kitkan vähentyessä veturin maksi-maalinen vetovoima pienenee. Myös esimerkiksi radan pituuskaltevyys vaikuttaa veto- ja jarrutusvoimien suuruuteen. (Iwnicki 2006) Kalustoon myös kohdistuu aina peruskulku-vastus sekä kaarrevastus, jotka ovat junan liikettä vastustavia voimia moitteettomassa kunnossa olevalla radalla. (Liikennevirasto 2010) Myös sivusuuntainen kallistus vaikut-taa pyörä-kisko-kontaktin kautta kalustoon kohdistuviin kuormituksiin. (Hakulinen et al. 2012)

Kiskon ja pyörän välinen kontakti on kitkallinen kontakti. Kitkaa tarvitaan pyörän pyöri-miseen, mutta pyörän pyörimisen estyessä liikkeen jatkuessa se aiheuttaa liikettä vastus-tavia voimia. Näitä vastustavia voimia kutsutaan liukuvoimiksi (creep forces). Pyörä voi myös kulkea radalla niin, että sen kulkutapa ei ole puhdasta vierimistä eikä puhdasta liu-kumista. Tätä ilmiötä kutsutaan osittaisluistoksi. Kun pyörään kohdistuu sivuttaissuun-taisia voimia, tapahtuu sivuttaissuuntainen osittaisluisto (lateral creep), kun radansuun-tainen osittaisluisto on pituussuuntaista osittaisluistoa (longitudal creep). (Wickens 2003)

Osittaisluistossa pyörän ja kiskon välinen suhteellinen nopeus poikkeaa nolasta, eli pyörä ei etene kiskolla pyörimänsä kehän matkaa. Kun pyöräkerta ei pääse liikkumaan vapaasti ja syntyy telin ja pyöräkerran välisiä voimia, muodostuu osittaisluistoa. Osittaisluisto johdattaa pyöräkerran ohjausvoimien syntyyn, jolloin pyöräkerta pykii hakeutumaan takaisin keskelle. Telin ja pyöräkerran ohjausvoimia aiheuttaa myös esimerkiksi kaarteessa tapahtuva laippakosketus, jolloin kisko ohjaa teliä kääntymään kaarteeseen suuntaisesti. Hyvän kulkemisen saavuttamiseksi tavoitellaan mahdollisimman pieniä ohjausvoimia. Pyörän kiertyessä kiskoilla syntyy kiskon ja pyörän väliin kohtauskulma (angle of attack). Kohtauskulman ollessa pieni, ei osittaisluistoa juuri synny. (Lichtberger 2005)

Pyörän ohjautuessa kaarteeseen ulomman pyörän kulkuympyrän säde on suurempi kuin sisäkiskolla kulkevalla pyörällä, jolloin pyöräkerta hakeutuu uuteen tasapainoasemaan. Tällöin pyöräkerralle tapahtuu poikittaissiirtymä, joka liian suureksi kasvaessaan aiheuttaa laippakosketuksen ja sen myötä suuria sivusuuntaisia voimia. Karttiokkuus vaikuttaa merkittävästi pyörien poikittaissiirtymään ja täten myös laippakosketuksen syntymiseen, sillä suurempi karttiokkuus lisää vierintäsäde-eroa poikittaissiirtymää kohden. Tällöin tasapainoaseman hakemiseksi ei tarvita niin suurta poikittaissiirtymää, jolloin laippakosketuksen todennäköisyys pienenee. Suurempi karttiokkuus myös parantaa pyöräkerran ohjautuvuutta, kun pyöräkerta hakee tasapainoasemansa tehokkaammin. (Hakulinen et al. 2012)

Pyörään osittaisluiston takia kehittyvät liukuvoimat pyrkivät ohjaamaan pyöräkertaa. Ne myös vaikuttavat pyörien ja kiskojen kulumiseen ja vierintäväsymiseen. Yksittäisen pyörän liukuvoimat voivat kasvaa moninkertaisesti suuremmiksi kuin tavanomaisen jarrutuksen yhteydessä muodostuvat pyörän ja kiskon väliset voimat. (Tunna et al. 2007; Hakulinen et al. 2012)

5.3.2 Värähtely

Värähtely koostuu määräajoin samankaltaisina toistuvista liikesarjoista. Junakaluston toistuvat liikkeet voivat aiheuttaa värähtelyä vaunun osissa, joka on haitallista vaunun ja radan rakenteiden kannalta. Jatkuva värähtely lisää eri osien rasituksia ja kuluttaa niitä, sekä lisää kuormituksia. (Salmi & Virtanen 2006) Värähtelyn vähentämisen kannalta on oleellista tuntea kaluston ominaisvärähtelymuodot ja niitä vastaavat taajuudet. Värähtelyä voidaan analysoida esimerkiksi mallintamalla tai mittaamalla vaunun värähtelyä.

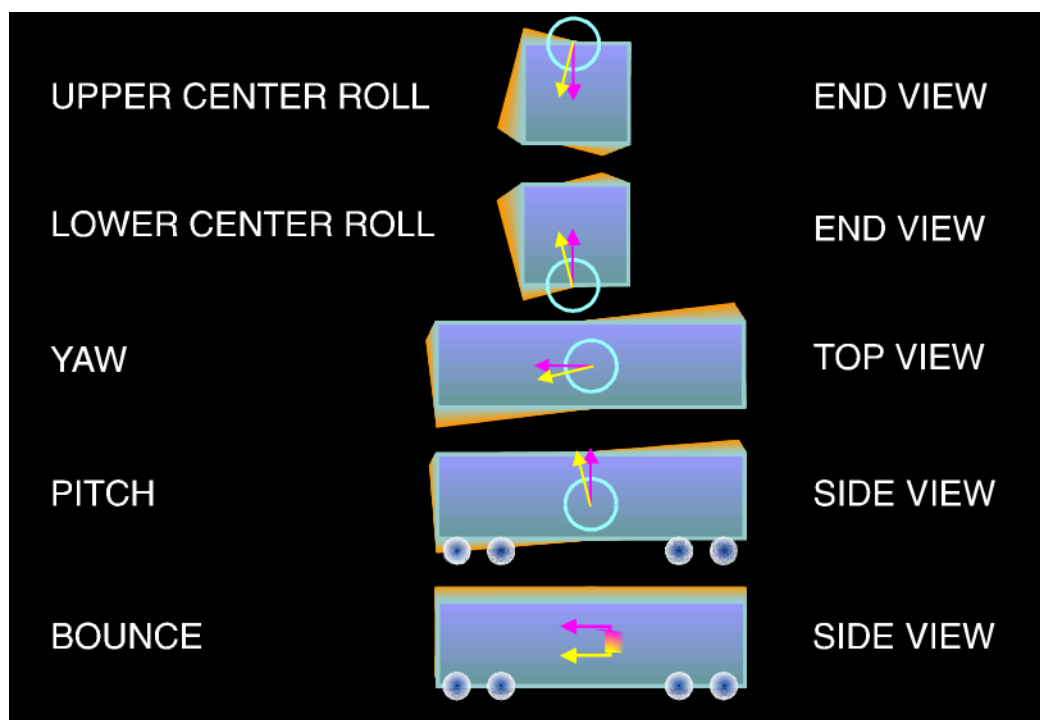
Mekaanisen systeemin ominaisvärähtely syntyy silloin, kun systeemi poikkeutetaan tasapainotilasta ja päästetään liikkumaan vapaasti ilman ulkoisia voimia. Tällöin sen palautusvoimat (kimmovoima, painovoima) pyrkivät palauttamaan systeemin takaisin tasapainoasemaansa, jolloin systeemi jatkaa liikettään tasapainoasemansa ympärillä lopulta palaten tasapainoon. Tätä toistuvaa tasapainoasemaan pyrkivää liikettä kutsutaan ominaisvärähtelyksi. (Salmi & Virtanen 2006)

Jos mekaaniseen systeemiin vaikuttaa palautusvoimien lisäksi jaksollisesti muuttuvia pakkovoimia, muuttuu ominaisvärähtely pakkovärähtelyksi. Molemmat värähtelyt voivat olla joko vaimenemattomia tai vaimenevaa. Vaimentamattomalla systeemillä ei ole ulkoista eikä sisäistä kitkaa, jolloin energiaa ei siirry muiksi olomuodoiksi ja systeemi jatkaa värähtelyä ikuisesti. Käytännössä värähtely on kuitenkin aina vaimenevaa kitkavoimien muuntaessa mekaanista energiaa lämmöksi. (Salmi & Virtanen 2006)

Systeemille tulee määrittää vapausasteiden lukumäärä laskentaa varten, jolloin määritetään systeemin riippumattomien koordinaattien määrä, jotka tarvitaan systeemin aseman määrittämiseksi kullakin ajan hetkellä. Todellisuudessa vapausasteiden lukumäärä on ääretön sen äärettömän monen massapisteen takia. Mallinnuksessa systeemiä yksinkertaistetaan äärellisellä määrällä jousia, massoja ja vaimentimia. Tällöin kullekin partikkelille eli pistemäiselle massalle käytetään yleensä kolmea koordinaattia ja jäykälle kappaleelle kuusi koordinaattia. (Iwnicki 2006) Vampire Pro ohjelmassa kuusi koordinaattistoa koostuvat kolmen suunnan siirtymistä (X, Y ja Z) sekä kunkin akselin suhteen kiertymistä (T, P ja W).

5.3.3 Junakaluston värähtelykäyttäytyminen

Junakaluston vaunurungolle on määritelty tyypillisiä perusvärähtelymuotoja, jotka on esitelty kuvassa 31. Kuvassa esiintyvät muodot pätevät yksittäisen vaunun värähtelyyn, mitä tarkastellaan myös tässä työssä. Kokonaisen nivelöidyn junakaluston tarkastelu on monimutkainen ilmiö, joka jätetään tämän työn ulkopuolelle.



Kuva 31. Vaunun ominaisvärähtelymuodot. (Transportation Technology Center Inc. 2010)

Kuvassa 31 alimpana esiintyvä bounce -muoto on vaunun pystysuuntaista värähtelyliikettä, johon vaikuttaa pääasiassa vaunun massa, jousituksen pystysuuntainen jäykkyys ja vaimennus. Toiseksi alimmaisessa värähtelyn pitch -muodossa vaunu kiertyy vaaka-akselin ympäri, jolloin värähtelyyn eniten vaikuttavat massa, vaunun hitausmomentti vaaka-akselin suhteen, pystysuuntaisen jousituksen jäykkyys ja vaimennus sekä telien etäisyys toisistaan. Kuvan keskimmäinen yaw -muoto kuvaa vaunun värähtelyä pystyakselinsa ympäri kiertymällä. Tähän muotoon vaikuttaa eniten vaunun massa, vaunun hitausmomentti pystyakselin suhteen, jousien vaakasuuntainen jäykkyys ja vaimennus, telien etäisyys toisistaan sekä telien ja vaunurungon välinen kiertojäykkyys, vaimennus ja kitka. (Hakulinen et al. 2012)

Ylimpänä kuvassa 31 on esitelty värähtelyn kahta roll -muotoa (upper center roll ja lower center roll), joissa värähtely tapahtuu pitkittäissuuntaisen akselin edestakaisena kierto- liikkeenä sekä siirtymänä. Kiertymiskeskiö voi sijoittua vaunun ylä- tai alaosaan, jonka perusteella muoto nimitään. Roll -muodon esiintymiseen vaikuttaa vaunun massa, hitausmomentti pituusakselin suhteen, vaunun painopisteen paikka pystysuunnassa, jousituksen vaaka- ja pystysuuntainen jäykkyys ja vaimennus sekä pystysuuntaisten jousien sivuttaissuuntainen etäisyys. (Hakulinen et al. 2012)

Moodianalyysissä voidaan käyttää myös muita värähtelymuotoja, jotka muodostuvat jo esitellyistä värähtelymuodoista ja erilaisten translaatioliikkeiden yhdistelmistä. Näitä muotoja ei kuitenkaan tulkita tässä työssä, sillä selkeiden jo esitellyjen värähdysmuotojen tunnistaminen ja tulkitseminen on helpompaa ja antaa näin ollen varmempia tuloksia. Tämän lisäksi myös kaluston eri osat voivat värähdellä useampaan suuntaan yhtäaikaaisesti, eli ilmentää esimerkiksi yaw ja roll -muotoja yhtäaikaaisesti. (Hakulinen et al. 2012)

Värähtelymuotojen herätteenä voivat toimia radan erilaiset epätasaisuudet, joiden johdosta syntyy dynaamisia kuormituksia ja vaunun värähtelyä. Pystysuuntaiset epätasaisuudet voivat toimia herätteenä pystysuuntaiselle värähtelylle, eli bounce ja pitch -muodoille, mikä lisää dynaamista pystysuuntaista kuormitusta. Sivusuuntainen poikkeama radassa taas altistaa esimerkiksi vaunun värähtelylle yaw tai upper center roll -muodossa. Tämän seurauksena akseli ja teli siirtyvät hetkellisesti pois tasapainoasemastaan aiheuttaen sivuttaissuuntaisia voimia. (Hakulinen et al. 2012)

Kaluston kulkiessa suoralla radalla siihen aiheutuu herkästi poikittaissuuntaista harmonista liikettä. Kun pyöräkertaa poikkeutetaan sivusuunnassa keskiasemasta, pyörien vierintäsaateet muuttuvat, jolloin pyöräkerta pyrkii kiertymään takaisin kohti keskiasentoa aiheuttaen jaksollista värähtelyä pyöräkerran kulkiessa raidetta pitkin. Tämä tasapainotilan hakeminen aiheuttaa harmonista poikittaissuuntaista värähtelyliikettä, jota kutsutaan Klingelin liikkeeksi. Pieni kartiokkuuden arvo aiheuttaa aallonpituudeltaan pidempää värähtelyliikettä, jolloin kartiokkuutta kasvattamalla saadaan aikaan pienemmän aallonpituuden värähtelyä. (Hakulinen et al. 2012)

5.4 Epätasaisuuksien aiheuttama värähtely

Radan geometrian vaihtelu ja epätasaisuudet aiheuttavat kaluston kulun muutoksia ja siitä seuraavaa värähtelyä. Geometrian vaihtelut voivat johtua lyhyistä vaaka- tai pystysuuntaisista poikkeamista, kuten kiskovian aiheuttamasta lovesta tai ratapölkkyjen alapuolisen tyhjätilan aiheuttamasta jäykkyydenmuutoksesta ja painumasta. Myös kaarresäteen muutokset vaikuttavat kulkuneuvon aiheutuviin värähtelyihin. (Iwnicki 2006) Edellisissä luvuissa on esitelty monia radan geometrian poikkeamia ja jäykkyyksmuutoksia, jotka vaikuttavat radan geometriaan.

5.4.1 Eritaajuiset värähtelyt

Erilaiset radan epätasaisuudet tuottavat eritaajuisia värähtelyjä kalustoon. Epätasaisuudet aiheuttavat kalustossa värähtelyä ja heilahtelua, mikä häiritsee matkustajia ja voi vaurioittaa kalustoa ja kiskoa. Matalataajuiset värähtelyt ovat matkustajan kannalta epämukavimpia. Korkeataajuiset värähtelyt, eli tärinä, kertovat usein kaluston tai radan ongelmista. (Esveld 2001; Iwnicki 2006) Kuvassa 32 on esitelty erilaisia kaluston ja radan värähtelyn taajuusalueita ja niiden aiheuttajia.

| problem | frequency range [Hz] |
|--|---------------------------|
| vehicle <ul style="list-style-type: none"> • stability • curvature and guidance behaviour • comfort | 0–30 |
| bogie and unsuspended masses <ul style="list-style-type: none"> • wheel bearings • operating strength of axles, bearings, brakes • operating strength of wheelsets • operating strength of bogie frames | 0–200 |
| problems of wheel and rail running faces <ul style="list-style-type: none"> • flats (wheel) • skid marks (sleeper) • non-circular wheels (polygonisation) • wheel corrugation • long-waved rail corrugation • short-waved rail corrugation • rail joints, badly ground welds • rolling contact fatigue defects (head checks, squats etc.) • wheel and rail wear | (50–200 Hz) 0–1500 |
| rail components <ul style="list-style-type: none"> • operating strength (fatigue) of rails • worn rail pads, ageing • concrete sleepers • ballast settlement and deterioration of track geometry • subsoil settlement | 0–1500 |
| noise caused by the contact wheel-rail <ul style="list-style-type: none"> • rolling noise • impact noise • screeching in curves | 0–5000 |
| structure-borne noise and shocks <ul style="list-style-type: none"> • spreading of shocks in the subsoil • shocks and sound radiation in bridges • sound emission • structure-borne noise and sound radiation of the vehicle body | 0–500 |

Kuva 32. Kaluston ja radan välisiä tyypillisiä taajuuksia erilaisissa tilanteissa. (Lichtberger 2005)

Kuvasta 32 nähdään, miten eri osien värähtelyt jakautuvat eri taajuusalueille. Vaunulla on suuri massa, jonka johdosta sen värähtelyn taajuudet ovat matalia. Vaunun värähtelyt vaikuttavat kaluston ajo-ominaisuuksiin ja ohjautumiseen kaarteissa. Kirjassa ”Track compendium” (Lichtberger 2005) on esitetty tyypilliseksi bounce -värähtelyksi yhden hertsin taajuutta matkustajavaunulle. Telin värähtelyjen arvojen on esitetty pysyvän tyypillisesti 10 Hz paikkeilla nousten korkeintaan 20 Hz lukemiin. Tämä johtuisi matkustajavaunulta vaadittavista hyvistä ajo-ominaisuuksista. Värähtelytaajuusalueet vaihtelevat hieman lähteestä riippuen. Matalataajuisien kuormitusten synnyttäjänä toimii usein joustitun kaluston massa, kun taas korkeataajuiset kuormitukset aiheutuvat pääasiassa jousittamattomasta massasta. (Esveld 2001)

Radan geometrian epäsäännöllisyydet voivat saattaa vaunurungon ja telin värähtelemään, vaikka vaunun ominaisuudet vaikuttavat suuresti syntyvän värähtelyn muodostumiseen ja taajuuteen. Varsinkin kiskovirheet aiheuttavat herkemmin korkeataajuisia värähtelyä (Hakulinen et al. 2012, Lyon 1972 mukaan). Esimerkiksi kiskossa oleva pitkäaaltoinen epätasaisuus aiheuttaa kalustoon matalataajuisempaa värähtelyä, kun taas lyhytaaltoinen radan epätasaisuus aiheuttaa korkeataajuisia värähtelyä eli tärinää sekä tästä aiheutuvaa ääntä. Pitkäaaltoiset epätasaisuudet aikaansaavat kalustossa myös vaakasuuntaisia siirtymiä, jotka huonontavat matkustusmukavuutta. (Iwnicki 2006)

5.4.2 Voimien vaikutus turvallisuuteen

Kiskon ja pyörän välisillä voimilla on merkitys kaluston turvallisen kulun kannalta. Liialliset sivusuuntaiset voimat voivat aiheuttaa esimerkiksi laipan nousun (flange climb), kiskon kaatumisen (rail rollover) tai raideleveyden levenemisen (gauge widening). (Iwnicki 2006) Kaluston värähtely tai esimerkiksi epätasaisuuden aiheuttamat kiihtyvyydet saattavat johtaa voimien kasvuun, mikä heikentää turvallisuutta.

Laipan nousu aiheutuu poikittaissuuntaisten voimien kasvaessa niin suuriksi, että laippa kohoo kiskon päälle. Tällöin yleensä myös pyörän pystysuuntainen kuormitus on merkittävästi pienempi, mikä voi johtua radan epätasaisuuksista, huonosta radan geometriasta tai roll -muotoisesta ominaismuotovärähtelystä. Tyypillisesti laipan nousu tapahtuu kaarteissa, jolloin suurin vaikutus on kaarresäteellä, radan ja kiskon profiileilla, telin jäykkyydellä ja ajonopeudella. Myös suoralla radalla tapahtuva laipan nousu on mahdollista, jos esiintyy suuria vaakasuuntaisia dynaamisia voimia esimerkiksi nopean jarrutuksen tai edestakaisin tapahtuvan heilunnan (hunting) yhteydessä. Laipan nousun seurauksena juna voi suistua raiteilta. (Iwnicki 2006)

Laipan nousun estämiseksi on olemassa useita eri alueilla käytössä olevia yleisiä ohjeita. Eräs käytetyimmistä on Nadalin yhtälö, joka perustuu pyörän laippakosketuksessa saamiin pystykuormituksen Q ja vaakakuormituksen Y suhteeseen Y/Q . Nadalin yhtälöllä saadaan konservatiivisia raja-arvoja, mutta ei oteta huomioon pituussuuntaisten liukuvoimien vaikutusta tai laipan nousuun vaadittavan matkan pituutta. (Iwnicki 2006)

Juna voi suistua radalta myös raideleveyden levenemisen tai kiskon kaatumisen seurauksena. Raideleveyden leveneminen tai kiskon kaatuminen vaatii yleensä suurehkon raideleveyden sekä suuria vaakasuuntaisia voimia. Tämän takia radalle on määritelty sallitut geometrian poikkeaman arvot sekä pyöräkerralle sallitut minimi- ja maksimimitat. (Trafi 2014) Pyöräkerran ja kiskojen kulumat kulkupinnoilta voivat heikentää pyöräkerran pysymistä raiteilla. (Iwnicki 2006) Kiskon kulumisen syitä on esitelty aiemmissa luvuissa 3.2 ja 3.3.

Kalustosta aiheutuvat poikittaistvoimat ovat suuri tekijä raideleveyden kasvussa, mikä lisää suistumisen riskiä. Telin yhden pyörän aiheuttama poikittaissuuntainen voima ei

kuitenkaan vielä riittä aikaansaamaan kiskossa poikittaissuuntaista siirtymää, mutta kahden peräkkäisen pyörän sivuttaisvoiman vaikutus voi aikaansaada jo merkittävän siirtymän. Kiskon kaatumisen todennäköisyyteen vaikuttavat pysty- ja vaakavoimien suhde sekä kiskon kulkureunan korkeus ja vaakasuuntainen leveys. (Hakulinen et al. 2012)

5.4.3 Kiihtyvyyksien raja-arvot

Radalle on määrätty myös kiihtyvyyksiin perustuvia raja-arvoja (taulukko 10). Kiihtyvyyksillä tarkoitetaan vaunun korista tai telistä mitattavia poikittais- ja pystykiihtyvyyksiä. Näiden avulla voidaan arvioida liikkuvan kaluston kulkuominaisuuksia radalla, jolloin instrumentoidulla tarkastusvaunulla voidaan saada selville värähtelyä aiheuttavia radan geometrian poikkeamia. Tämä on erityisen hyvä tarkastelukeino, kun geometriavirheiden aallonpituudet ovat mittavaunun mittakantaa pidempiä sivu- tai korkeussuunnan poikkeamia, jolloin mittavaunu ei välttämättä huomaa virhettä. Yleensä kiihtyvyyksien mittauksia tehdään, kun on syytä epäillä matkustusmukavuuden heikkenemistä. Kiihtyvyyksien mittaukset tehdään suurinta sallittua nopeutta käyttämällä. (Ratahallintokeskus 2006)

Taulukko 10. Kiihtyvyyksien mittauksen raja-arvoja. (Ratahallintokeskus 2006)

| Virheluokka | Poikittaiskiihtyvyys $\ddot{y}_{s \text{ lim}}^*$ [m/s ²] | Pystykiihtyvyys $\ddot{z}_{s \text{ lim}}^*$ [m/s ²] |
|-------------|--|---|
| C | 1,3 + a_{q0} | 1,3 |
| D | 1,5 + a_{q0} | 1,5 |
| ★ | 2,5 + a_{q0} | 2,5 |

$\ddot{y}_{s \text{ lim}}^*$ poikittaiskiihtyvyys vaunun korista telikeskiön päältä

$\ddot{z}_{s \text{ lim}}^*$ pystykiihtyvyys vaunun korista telikeskiön päältä

a_{q0} keskipakoisvoiman aiheuttama kompensoimaton poikittaiskiihtyvyys

Kiihtyvyyksien mittaukset pätevät sekä moottori- että henkilövaunukalustolle. Jos kiihtyvyyksien mittauksia tehdessä D-luokan raja-arvot ylittyvät samanaikaisesti pysty- ja poikittaissuunnassa, muuttuu virhe *-luokan eli huonoimman mahdolliseen luokan virheeksi. *-luokan kiihtyvyyksien ylittyessä toimitaan samoin kuin *-luokan geometriavirheiden arvojen ylittyessä, eli ryhdytään välittömiin toimenpiteisiin. (Ratahallintokeskus 2006) Poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä voidaan vähentää esimerkiksi nopeutta vähentämällä ja kaarteiden kallistusta sekä kaarresädetä muuttamalla. Pystykiihtyvyyksiin vaikuttavat pystysuuntaiset epätasaisuudet sekä ajettu nopeus. (Liikennevirasto 2010)

6. KALUSTOMALLINNUS

Mallinnus on tehokas keino tutkia kalustotyyppien käyttäytymistä rataosuuksilla, joilla on erilaisia epätasaisuuksia. Mallin avulla voidaan tarkastella haluttujen kaluston osien kiihtyvyyksiä sekä siirtymiä, joita on helppo vertailla mittauksilla saatuihin tuloksiin tai raja-arvoihin. Mallia rakentaessa on tärkeää perehtyä todellisen vaunun rakenteeseen ja toimintaan, jotta mallista osataan rakentaa riittävän tarkasti todellisuutta vastaava. Tässä luvussa on esitelty kaksikerroksisen vaunun ominaisuuksia sekä mallin rakennukseen käytettyjä parametreja ja ratkaisuja.

6.1 Kaksikerroksinen IC-vaunu

Kaksikerroksinen Intercity-matkustajavaunu on otettu Suomessa käyttöön vuonna 1998 (kuva 33). Vaunun suunnittelussa on käytetty mallina Sveitsin rautatieyhtiön lähiliikenteen kaksikerrosvaunua, mutta se on sovitettu Suomeen sopivammaksi. Vaunut on tilattu suomalaiselta Transtechiltä ja niitä on tällä hetkellä liikenteessä 152 kappaletta. Kaksikerrosvaunun etu perinteiseen yksikerroksiseen vaunuun on tehokkaampi tilankäyttö sekä 20 % pienempi paino per istumapaikka, mikä laskee vaunun hankinta- ja käyttökustannuksia. (Resiina 2015)



Kuva 33. Kaksikerroksinen matkustajavaunu. (Transtech 2015)

Kaksikerroksisia vaunuja on Suomessa kolme päätyyppiä. Perusmallin eli Ed-vaunun molemmat kerrokset ja päädyt on varusteltu matkustajaistuimilla. Tässä työssä tarkastellaan perustyyppin vaunua. Lisäksi on myös olemassa Eds-vaunu, joka on suunnattu erityi-

sesti liikuntarajoitteisille ja lapsiperheille, sekä Edfs-vaunu, joka poikkeaa edellisestä sisältäen vielä konduktöörin työpisteen ja tilat kylmälaitteille. Lisäksi on rakennettu 40 kappaletta kaksikerroksisia makuuvaunuja, jotka liikennöivät pääasiassa pitkillä välimatkoilla. (Transtech 2015)

Taulukossa 11 on esitelty perustietoja kaksikerroksisen vaunun massoista ja mitoista. Vastaavia tietoja on hyödynnetty myös mallin rakentamisessa. Kaksikerroksinen matkustusvaunu on kaksikerroksista makuuopvaunua hieman raskaampi sekä yksikerroksista vaunua huomattavasti raskaampi.

Taulukko 11. Kaksikerroksisen vaunun massojen ja mittojen tiedot. (Ratahallintokeskus 2005b)

| | |
|--|---------------------------------|
| Paino kuormattuna | 63 t |
| Suurin sallittu akselipaino | 18,5t |
| Vaunun massa | 50,5 t |
| Telin massa | 2981 kg |
| Axle Guiden massa | 89 kg |
| Pyöräkerran massa | 1460 kg |
| Pyörän halkaisija | 920 mm uutena, 840 mm kuluneena |
| Telikeskiöväli | 19,80 m |
| Telin pyöräkertoimien välinen etäisyys | 2,50 m |

Taulukossa 12 on esitelty vaunun valmistajan julkaisemia perustietoja kaksikerroksisesta matkustajavaunusta. Taulukossa esiintyviä tietoja on hyödynnetty esimerkiksi malliin sijoitetun toisen kerroksen kiihtyvyysanturin sijainnin hahmottamisessa, jotta pystyttiin pääättelemään toisen kerroksen matkustajan sijainti. Perustiedoissa ilmenee myös kaluston teli ja maksiminopeus.

Taulukko 12. Kaksikerroksisen vaunun muita mittoja. (Transtech 2015)

| | |
|-------------------------------|----------|
| Pituus | 26,4 m |
| Leveys | 3,2 m |
| Korkeus kiskon pinnasta | 5,2 m |
| Lattiakorkeus kiskon pinnasta | 55 cm |
| Taarapaino | 51 t |
| Maksiminopeus | 200 km/h |
| Teli | TB201 |
| Yläkerran vapaa korkeus | 2,18 m |
| Alakerran vapaa korkeus | 2,2 m |

Kaksikerrosvaunun teli on ilmajousitettu TB 201, joka on suunniteltu 200 km/h maksiminopeudelle. Yhdessä vaunussa on kaksi teliä ja telissä on aina kaksi akselia. Teli on tyypillinen keskipalkiton teli (bolsterless bogie), eli sen toiminta perustuu kahden telin

keskikohdan sivuissa oleviin ilmajousiin sekä anti-yaw-vaimentimiin. (Transtech 2015)
Kuvassa 34 on esitelty kaksikerroksisen vaunun teli.



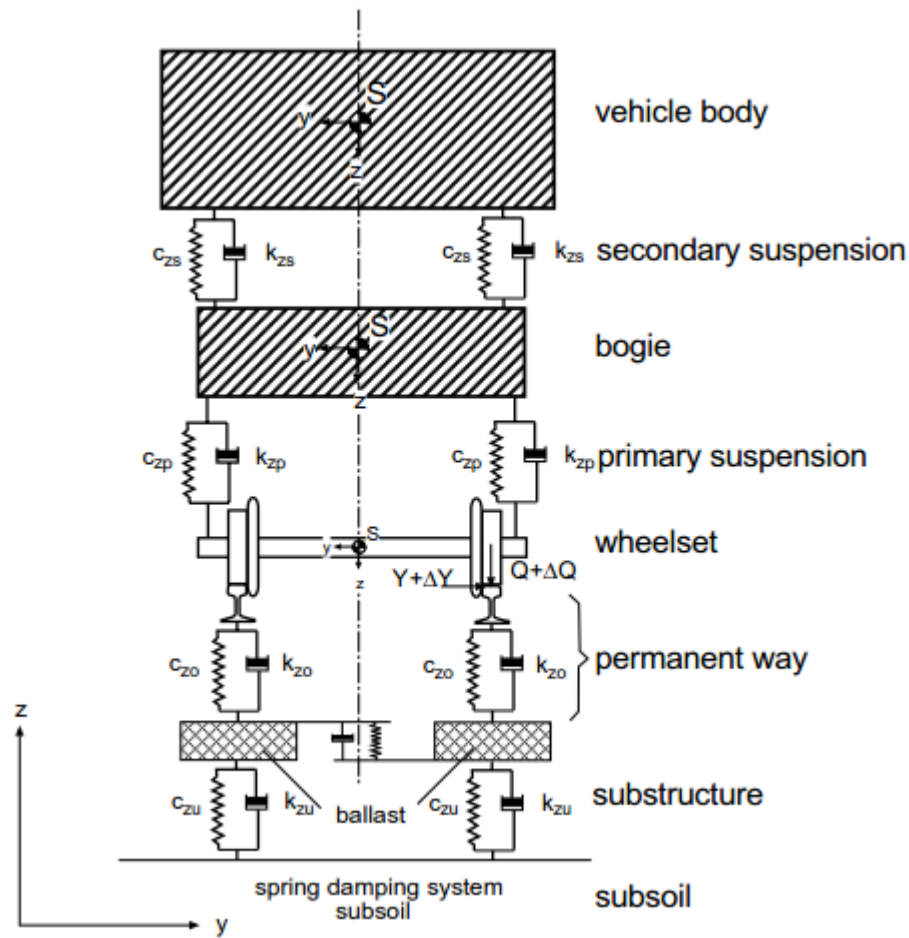
Kuva 34. Kaksikerroksisen matkustajavaunun TB 201 telistä. Ilmajousi näkyy telin keskikohdassa tummanharmaana ja anti-yaw-vaimennin on sen ulommalla puolella pitkitäisesti suuntautuneena. (Transtech 2015)

Yllä olevasta kuvasta voidaan hahmottaa telille tyypillinen ilmajousi sekä anti-yaw-vaimennin. Kuvassa nähdään myös muita telin vaimentimia sekä jousituksia.

6.2 Mallin rakentaminen

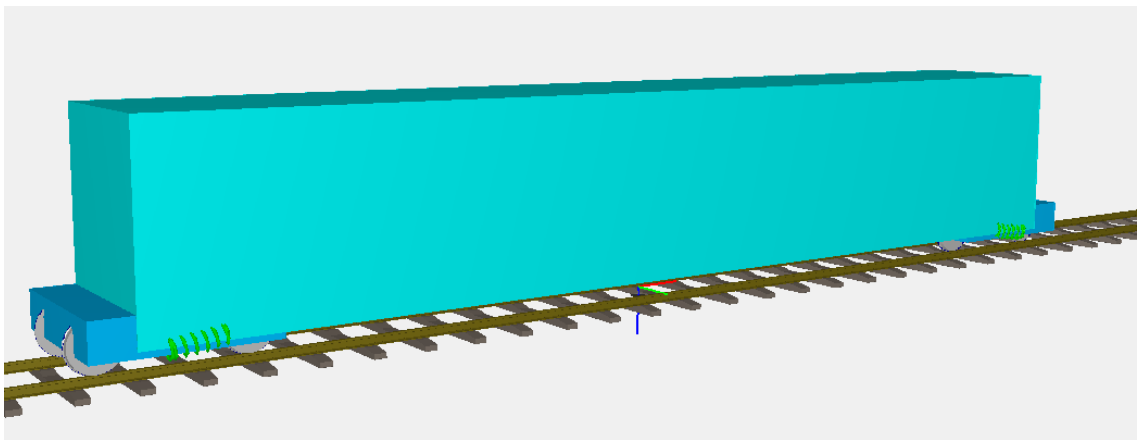
Kaksikerroksisen vaunun mallinnuksessa käytettiin vaunun valmistajan Transtechin luotamuksellisesti luovuttamia tietoja, julkisesti saatavilla olevaa edellä esitettyä tietoa, muiden mallinnustapausten perusteella pääteltyjä ja kokeiltuja ratkaisuja sekä ohjelman valmistajan neuvomia käytäntöjä. Rakennettu malli on yksinkertaistettu versio oikeasta kaksikerroksisesta vaunusta. Malli rakennettiin monikappaledynamiikkaan perustuvan Vampire pro -ohjelman avulla, jolloin mallit koostuvat massoista ja pyöräkerroista, jotka yhdistetään toisiinsa erilaisin jousituksin.

Kuvassa 35 on havainnollistettu vaunun massojen ja jousituselementtien suhteita toisiinsa. Vaunu on kiinnitetty teliin erilaisin jousin ja vaimentimin, ja teli taas on kiinnitetty pyöräkertaan. Myös kiskoja alaiset rakennekerrokset havainnollistetaan jousien ja vaimentimien avulla.



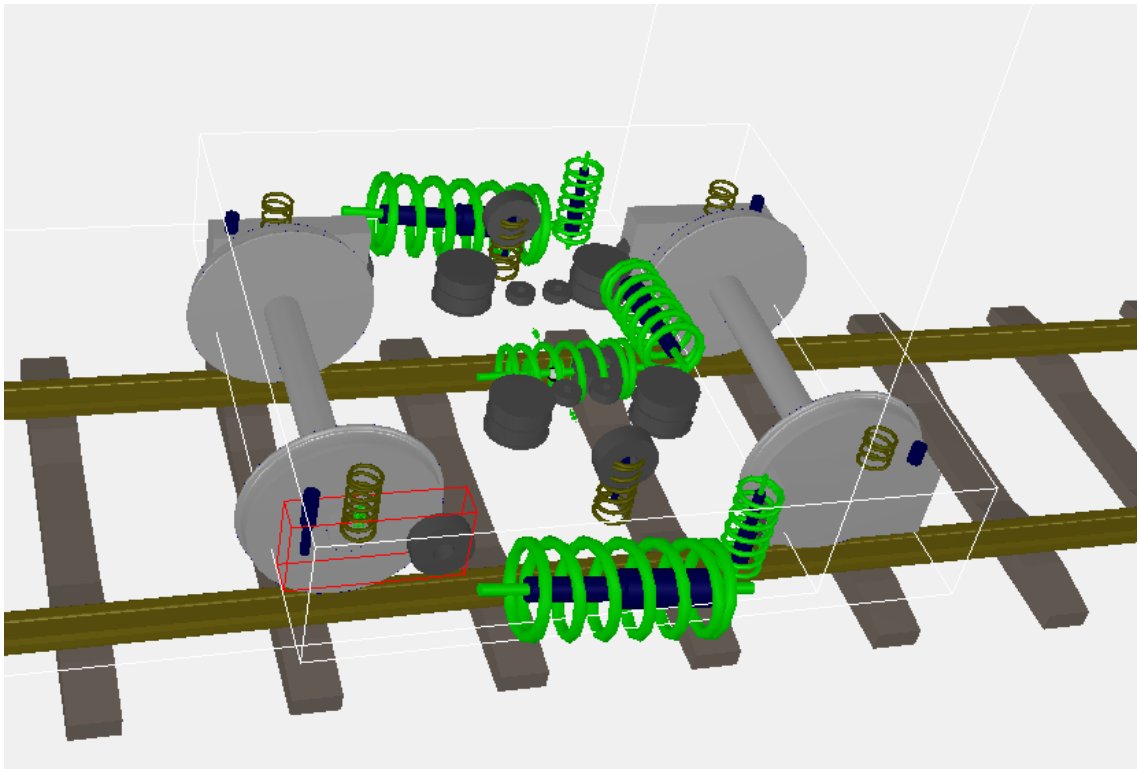
Kuva 35. Vaunun massojen välisten jousien havainnollistaminen. Vampire pro -ohjelmassa rakennekerrosten systeemi yksinkertaistettu versio kuvasta.. (Lichtberger 2005)

Kuvassa 36 nähdään valmis malli sivusta. Kuvassa vaaleansinisellä kuvattu osa on vaunurungon massa, joka peittää osin tummansinisellä kuvattujen telien massoja. Telistä lähtevät pyörät sekä vihreällä näkyvät anti-yaw-jouset. Malli siis koostuu vaunurungosta, kahdesta telistä ja neljästä pyöräkerrasta. Pyöräkertojen massat on saatu Transtechiltä.



Kuva 36. Rakennettu kaksikerroksinen Ed-vaunumalli sivusta ja takaviistosta katsottuna.

Vaunurunko liittyy teliin sekundäärijousituksen avulla ja teli taas pyöräkertoihin primäärijousituksen avulla, jotka nähdään kuvassa 37. Kuvassa näkyvä punainen laatikko on laakeripesä (axle guide), joka on mallinnettu kiinteästi pyöräkertaan kiinni. Punaisen laatikon sisällä näkyy primäärijousitus. Primäärijousitukseen kuuluu primäärinen jousi ja sen sisällä oleva liikerajoitin (bump stop), jotka sijaitsevat keskitetysti. Tämän lisäksi primäärijousitukseen kuuluu epäkeskeinen primäärinen vaimennin sekä pyörivää liikettä rajoittava holkki (bush), joka on kohtuullisen jäykkä pituus- ja pystysuuntaan nähden, sekä vaimentaa tärähdyksiä. Bush-elementin avulla voidaan mallintaa yhden pisteen jäykkyyttä ja vaimennusta haluttuihin suuntiin.



Kuva 37. Kaluston telin rakenne. Piilotetun laakeripesän (axle guide) viivat kuvassa punaisella.

Kuvassa 37 näkyvät loput jouset ja vaimentimet kuuluvat sekundäärijousitukseen, eli liitävät vaunun teliin. Uloimmat vaimentimet ja jouset ovat anti-yaw-jousituksia, jotka estävät yaw -muotoista ominaisvärähtelyn syntymistä. Ominaismuodot on esitelty luvussa 5.3.3. Näiden vieressä on pystysuuntaista kuormitusta kannattelevat jousen ja vaimentimen yhdistelmä. Teliin pyörien välissä on jousesta ja bush-elementistä muodostuva kokonaisuus, joka mallintaa telin ilmajousitusta. Tämän lisäksi keskemmällä on pystysuuntaista kuormitusta kannattelevia bush-elementtejä, sekä vaaka- ja pituussuuntaisia voimia vastustavia liikkeenrajoittimia, vaimentimia ja jousituksia.

Malliin on sijoitettu värähtelyn tarkastelua varten kiihtyvyyssantureita vaunurunkoon kolmeen kohtaan sekä yksi siirtymäanturi. Myös vaunun teliin ja pyörään on sijoitettu kiih-

tyvyysantureita mallin toimivuuden tarkastelua varten. Kiihtyvyysanturien sijainnit esitetään taulukossa 13. Ohjelman koordinaatisto sijaitsee keskellä vaunua radan tasossa, jolloin Z on positiivinen ylöspäin, X on positiivinen kulkusuuntaan ja Y on positiivinen kulkusuuntaan nähden oikealle puolelle.

Taulukko 13. Vaunussa sijaitsevat kiihtyvyysanturit sekä siirtymäanturi.

| Kiihtyvyysanturit | Nimi Vampiressa | Nimi työssä | Sijainti, m | | |
|-------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| | | | X | Y | Z |
| Vaunu | Carbody Z,Y,X accln at centre | 1krs.Mkp | -0,096 | 0,00 | 2,388 |
| | Carbody Z,Y accln backbogie | 1krs.Teli | -9,9 | 0,002 | 2,388 |
| | Carbody Z,Y accln passenger | 2krs.Teli | -9,9 | 0,002 | 4 |
| Teli | Bogie Z,Y accln | | -9,9 | 0 | 0,539 |
| Pyörä | Wheel Right Z,Y accln | | Oikean pyörän keskikohta | | |
| | Wheel Left Z,Y accln | | Vasemman pyörän keski kohta | | |
| | Wheel Centr Z,Y accln | | Pyöräkerran keskikohta | | |
| Siirtymäanturi | | | | | |
| Vaunu | Carbody Z,Y movement passenger | Pystysiirtymä, Sivusiirtymä | -9,9 | 0,002 | 4 |

Vaunumallin kiihtyvyysantureiden tuloksia on käytetty työssä värähtelyjen tarkasteluun. Ensimmäinen mittapiste sijaitsee vaunun massakeskipisteen kohdalla ja toinen samalla korkeudella, mutta taaimmaisen telin kohdalla vastaten matkustajan sijaintia 1. kerroksessa. Näin voidaan tarkastella vaunun osien kiihtyvyyksien eroja ja tehdä niistä päätelmiä esimerkiksi värähtelymuodoista. Nämä pisteet sijaitsevat ensimmäisessä kerroksessa, joten kolmanneksi pisteeksi valittiin tarkasteluun mittapiste toisesta kerroksesta viimeisenä tulevan telin kohdalta. Mittapiste on valittu siten, että korkeus vastaisi suunnilleen toisen kerroksen matkustajan sijaintia, jolloin mittapisteen kiihtyvyyksistä voitaisiin tehdä vertailuja ensimmäisen ja toisen kerroksen matkustajien kokemista värähtelyistä.

Mallille suoritettiin myös ominaisvärähtelymuotojen analyysi, jonka tuloksia on esitelty seuraavassa luvussa. Analyysin avulla pystyttiin tarkistamaan mallin toimivuutta, sillä analyysi varmistaa massa-, jäykkyys- ja vaimennusmatriisien toimivuuden ja toimivatko mallin eri osien kiinnitykset toisiinsa nähden järkevällä tavalla.

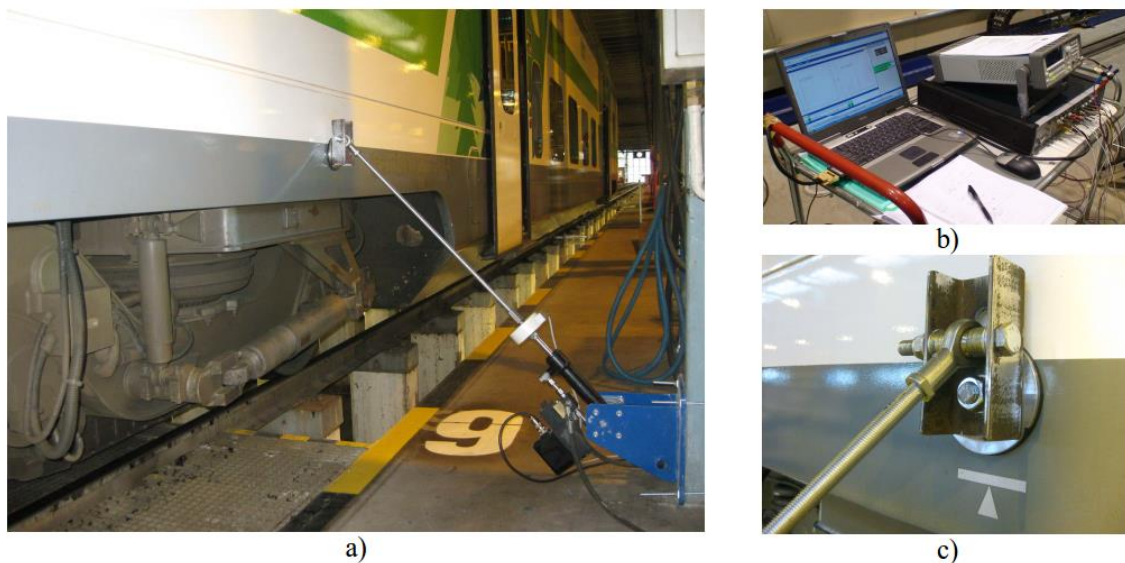
7. KALUSTOMALLIN OMINAISMUOTOANALYYSI

Mallin verifioiminen on tärkeää mallista saatavien värähtelyjen todenmukaisuuden arvioimisessa. Kalustomallin verifiointilla tarkoitetaan mallista mitattujen arvojen vertaamista oikeasta kalustosta saatuihin arvoihin ja tarvittaessa mallin muokkaamista siten, että mallin käyttäytyminen vastaa riittävällä tarkkuudella oikean kaluston käyttäytymistä. Tässä työssä mallista saatavien ominaisvärähtelyarvoja verrataan todellisen kaluston mittauksilla saatuihin ominaisvärähtelyarvoihin. Näin voidaan varmistaa mallin joutussysteemin toimivuus ja riittävä vastaavuus todellisen kaluston suhteen. Ominaisvärähtelymuodoista on kerrottu aiemmin luvussa 5.3.3.

7.1 Analyysin pohjana käytetyt mittaukset

Kalustomallin verifiointia varten mitattiin todellisen junakaluston ominaisvärähtelyjä, jotta niitä voitaisiin verrata mallista saatuihin arvoihin (Miettinen 2015). Mittaukset suoritettiin tästä työstä erillisenä työnä. Mittauksissa kaksikerrosvaunun korille ja telille tehtiin moodianalyysi. Tulosten avulla voidaan varmistaa, että mallin värähtelykäyttäytymisen vastaa todellista vaunun käyttäytymistä. Tämä lisää mallista saatujen tulosten luotettavuutta.

Mittaukset suoritettiin hallissa, jolloin vaunu oli irrotettu muusta kalustosta. Tällöin päästiin tarkastelemaan vain vaunun ominaisvärähtelyjä. Rakenteiden värähtelyjen herättämiseen käytettiin hydraulista tärhistintä, joka kohdistettiin vaunun sivulla olevaan nostotapin reikään (kuvassa 38). Herätevoimaa mitattiin venymäliuska-tyyppisellä voima-anturilla ja vasteita tarkasteltiin kiihtyvyysantureiden mittaamien kiihtyvyyssignaalien avulla. Mittausjärjestely ei ollut takaisinkytketty, joten herätevoiman suuruus vaihteli herätteen taajuuden mukaan. Herätettä nostettiin käsin käyttäen vaunun korille taajuuskaistaa 0,1 – 5 Hz ja telille 5 – 25 Hz. (Miettinen 2015)



Kuva 38. a) Hydraulinen täristin ja voima-anturi kiinnitettynä nostotapin reikään. Täristin kiinnitettiin toisesta päästä siltanosturin teräspylvääseen kiinnitysraudoilla. b) Käytetyt mittalaitteet. c) Herätevoiman vienti nostoreikään laipan ja nivelöidyn kiinnityksen avulla. (Miettinen 2015)

Analyysyjä suoritettiin kahdelle mittaukselle vaunurungosta ja yhdelle vaunun telin mittaukselle. Mittauspisteet korianalyyssissä ja herätteen antopiste pysyivät samana. Mittauksista analysoitiin ominaistaajuus ja muoto LMS PolyMax ohjelmiston avulla. Analyysistä myös koottiin ominaismuotojen animaatiot, joista ominaismuotojen tunnistaminen kävi helpommin. (Miettinen 2015)

7.2 Mittausten tulokset

Junan vaunun korista tehty kaksi mittausa tehtiin hieman eri tavoin. Toisella mittauksella taajuutta kasvatettiin alhaisilla taajuuksilla, eli 0,1 Hz – 3 Hz hitaammin kuin ensimmäisellä mittauksella. Näin varmistettiin, että kaikki ominaismuodot ehtivät heräämään näillä taajuuksilla. Jotkut ominaismuodot saattoivat jäädä heräämättä, sillä heräteitä ei voitu antaa pitkittäissuuntaisesti junan liikkumisen estämiseksi. Myös portaittain käsin taajuuden muuttaminen saattaa jättää joitain taajuuksia välistä. Taajuuden portaittain muuttamisen avulla pystytään kuitenkin keskittymään yksittäiseen taajuuteen kauemmin sen ominaismuodon heräämisen varmistamiseksi. (Miettinen 2015)

Taulukossa 14 on esitelty mittauksien ja mittauspisteiden videoiden tulkintojen perusteella vaunun arvioidut ominaismuodot, sekä niiden taajuudet ja vaimennusprosentit. Ensimmäisellä mittauksella saatiin selkeämmin näkyviä ominaismuotoja esiin, mutta myös toisella mittauksella ominaismuotoja heräsi. (Miettinen 2015)

Taulukko 14. Vaunun saavuttamat ominaismuodot, niiden taajuudet sekä vaimennus. (Miettinen 2015)

| Mittaus 1 | | | Mittaus 2 | | |
|--------------|---------------|-----------------------|--------------|---------------|--------------------|
| Taajuus (Hz) | Vaimennus (%) | Liike | Taajuus (Hz) | Vaimennus (%) | Liike |
| 0,816 | 11,97 | Lower Roll | 0,785 | 10,26 | Lower Roll |
| 1,698 | 15,02 | Yaw, selkeä | 1,602 | 14,23 | Yaw, selkeä |
| 3,688 | 4,18 | Bounce, selkeä | 2,165 | 2,13 | Bounce |
| 4,633 | 1,9 | Pitch, selkeä | 3,48 | 9,58 | Pitch |

Taulukkoa 14 tarkastellessa huomataan lower roll -muodon olevan pienimmän taajuuden värähtelymuoto, kun taas toisiaan lähellä olevat muodot bounce ja pitch heräävät korkeammilla taajuuksilla. Todellisuudessa ominaismuodot eivät aina herää selkeästi ja ne voivat herätä myös yhtäaikaaisesti. Näin ollen selkeimmän ominaismuodon löytäminen on jonkin verran myös tulkinnasta kiinni. Taulukossa 14 osa ominaismuodoista on tällaisia useampaa ominaismuotoa yhtä aikaa ilmentäviä värähtelymuotoja, jolloin vahvimmin ilmentyvä ominaismuoto on merkitty. Muodon ollessa selkeä, ominaismuoto on tulkittu ja sen viereen on merkitty teksti ”selkeä”. Tällöin vaunun liikkeissä ei ole havaittavissa juurikaan muita ominaismuotoja.

7.3 Oinaisvärähtely mallissa

Mallin ominaismuotoanalyysistä selvitetään eri ominaismuotojen saamia tyypillisiä värähtelyn taajuuksia sekä niille saatuja vaimennuksen arvoja. Vampire Pro:n ohjeiden mukaan alle 2 % vaimennuksen arvot voivat olla merkinä mallissa esiintyvistä virheistä. Vaimennus kuvastaa sitä kuinka nopeasti herännyt taajuus vaimenee mallissa.

Vaunumallin ominaismuotoanalyysi on suoritettava mahdollisimman pienellä nopeudella, jotta vaunun muu värähtely ei sotke ominaisvärähtelyä. Nopeutta 0 m/s ei voida kuitenkaan käyttää, koska vaunun on oltava liikkeessä kaikkien muotojen heräämiseksi, joten käytetään ohjeissa suositeltua mahdollisimman pientä nopeutta 0,01 m/s. Näin mallinnus vastaa paremmin moodianalyysissä paikallaan suoritettujen mittausten tuloksia. Ominaismuotoanalyysistä mallille saadaan 46 vapausastetta.

Taulukossa 15 on esitetty mallissa esiintyvien ominaismuotojen taajuudet ja niiden vaimennusprosentit. Ominaismuodot tulkitaan ohjelman animaatiosta. Selkeät muodot on merkitty taulukkoon tummennetulla ja epäpuhtaat muodot on merkitty sulkuihin.

Taulukko 15. Mallissa esiintyvät ominaisvärähtelymuodot.

| Taajuus (Hz) | Vaimennus (%) | Liike |
|--------------|---------------|------------------------|
| 1,145 | 2,176 | Lower Roll |
| 2,697 | 4,95 | Bounce |
| 3,294 | 6,967 | Pitch |
| 5,945 | 34,556 | Yaw (epäpuhdas) |
| 6,809 | 42,008 | Upper Roll (epäpuhdas) |

Kun vertaillaan taulukkoa 15 mallissa esiintyvistä ominaisvärähtelyistä taulukkoon 14 vaunusta mitattuihin ominaismuotoihin, huomataan lower roll -ominaismuodon saavan taajuudeltaan samankaltaisia arvoja. Mallin vaimennus on todellisesta vaunusta mitattua arvoa pienempi, jolloin mallin lower roll -muoto ei ehkä vaimene niin nopeasti kuin oikeassa kalustossa.

Ominaismuodoista yaw -muoto esiintyy mitatussa vaunussa selkeästi kummallakin mitauskerralla saman suuruusluokan arvona, joten sitä voidaan pitää hyvin luotettavana. Mallissa aikaansaatu yaw -muoto on kuitenkin epäpuhdas ja ehkä osittain myös siitä syystä saa liian suuria taajuuden ja vaimennuksen arvoja.

Pitch ja bounce -muotojen ominaistaajuuDET ovat lähellä toisiaan, vaikka saavatkin mitattujen arvojen selkeistä muodoista poikkeavia arvoja. Sen sijaan taulukossa 14 mittauksella 2 saadut vähemmän selkeät bounce ja pitch -ominaismuodot ovat suhteellisen yhteneviä mallista mitattujen arvojen kanssa. Myös vaimennuksen arvot ovat kohtalaisen lähellä toisiaan.

Mallista saatua epäpuhdasta upper roll -värähtelymuotoa ei saatu aikaan moodianalyysimittauksista tehdessä, joten sille ei ole vertailukohdetta. Olemassa olevien arvojen perusteella vertailu on kuitenkin jo mahdollista tehdä. Moodianalyysitulosten ja mallista saatavien ominaisvärähtelyn tulosten yhtenevyyteen ei ole vielä kehitetty suoranaisia raja-arvoja tai ohjeita. Mallista saadut tulokset poikkeavat aina jonkun verran mittauksilla saaduista tuloksista, sillä mittauskertojenkin välillä on pieniä eroja. Myös muun muassa mitatun vaunun jousien kunto ja annettu heräte vaikuttavat saatujen tulosten yhtenevyyteen. Näiden seikkojen valossa voidaan ajatella moodianalyysin tulosten vastaavan kohtalaisen hyvin mallista saatuja ominaisvärähtelyn tuloksia, lukuun ottamatta mallista saatua epäselvää yaw -värähtelymuodon tulosta. Kaksikerroksisen vaunun kiihtyvyyksien tuloksia voidaan näin ollen pitää suuntaa-antavina todellisen vaunun kiihtyvyyksistä.

Ominaismuotojen arvoja vertailtaessa pitäisi mallista saatu yaw -ominaismuodon arvo saada vastaamaan paremmin oikeasta vaunusta mitattua yaw -ominaismuodon taajuuden ja vaimennuksen arvoja. Yaw -ominaismuotoon vaikuttaa eniten vaunun massa, vaunun hitausmomentti pysty akselin suhteen, jousien vaakasuuntainen jäykkyys ja vaimennus, telien etäisyys toisistaan sekä telien ja vaunurungon välinen kiertojäykkyys, vaimennus ja kitka, kuten aiemmin kappaleessa 5.3.3 on esitetty. Todennäköisesti mallissa kyse on

vaunun ja telin välisestä kiertojäykkyydestä ja sen puutteesta, sillä näiden suhteen on jouduttu tekemään eniten kompromisseja työn aikana. Telin ilmajousia ja telin ja vaunun välisiä bush-elementeistä rakennettuja kiinnityksiä parantelemalla yaw -ominaismuoto voitaisiin saada vastaamaan paremmin todellisuutta.

Koska bounce ja pitch -ominaismuodot vastaavat suhteellisen hyvin mitattuja arvoja, voidaan pystysuuntaisten jousitusten päätellä vastaavan kohtuullisen hyvin alkuperäistä vauhua. Näin ollen myös mallista mitattuja pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä voidaan pitää suhteellisen luotettavina. Sen sijaan poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien luotettavuutta mallin verifiointi todennäköisesti parantaisi. Tämän työn puitteissa ei verifiointia kuitenkaan enää suoriteta.

8. SIMULOINTI

Radan erilaisten geometriavirheiden aiheuttamia värähtelyjä tutkitaan rakennetulla kaksikerrosvaunulla Vampiressa suoritettavien simulointiajojen avulla. Simulointitapauksiin voidaan määritellä halutut radan parametrien arvot, jolloin radasta voidaan käytännössä muokata täysin halutunlainen tai käyttää jotain valmista radan mittausdataa. Tarkasteltavia suureita on tarjolla useita, mutta tässä työssä keskitytään kiihtyvyyksien ja siirtymien tarkasteluun.

Luvun alussa esitellään eri simulointitapaukset, jonka jälkeen käydään läpi simulointitapauksilla saatuja tuloksia.

8.1 Eri simulointitapausten esittely

Erilaiset simulointitapaukset eli radan geometriavirheet on valittu Liikenneviraston ohjeesta ”Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta” (Ratahallintokeskus 2005). Simuloinnissa oletetaan muu radan rakenne täysin virheettömäksi, jolloin ainut poikkeama geometriassa tapahtuu halutulla tarkastelualueella.

Eri simulointitapausten tarkasteluun valittiin Liikenneviraston ohjeen mukaiset D- ja *-luokat. Tämän lisäksi simulointitapauksiin on otettu mukaan tarkasteltavaksi kuvitteellinen H-luokka, joka on D- ja *-luokan erotuksen verran *-luokkaa suurempi geometrinen poikkeama. Näin pystyttiin tarkastelemaan myös olemassa olevia luokituksia huonompia tilanteita.

Luvussa 5.4.3 on esitelty kiihtyvyyksien raja-arvoja. Liikennevirasto on määrittänyt luokalle D kiihtyvyyden raja-arvoksi $1,5 \text{ m/s}^2$ ja luokalle * $2,5 \text{ m/s}^2$ pystykiihtyvyydelle ja sivukiihtyvyydelle suoralla radalla. Jos D-luokan raja-arvot ylittyvät samanaikaisesti pysty- ja poikittaissuunnassa, muuttuu virhe *-luokan virheeksi. Koska luokka H on kehitelty tätä työtä varten, sille ei ole määritelty omia varsinaisia raja-arvoja. Näin ollen sen arvoja on verrattu luokan * raja-arvoihin eli $2,5 \text{ m/s}^2$.

Kaluston kiihtyvyyksiä mittaavat anturit on sijoitettu jo aiemmin luvussa 6.2 esiteltyihin mittapisteisiin mallissa. Mittapisteet sijaitsevat siten, että ne havainnollistaisivat matkustajien kokemia värähtelyjä. Ensimmäinen mittapiste sijaitsee vaunun massakeskipisteessä, jolloin siihen kohdistuneita kiihtyvyyksiä voisi verrata ensimmäisessä kerroksessa vaunun keskikohdassa matkustavan kokemiin värähtelyihin. Toinen mittapiste sijaitsee samalla korkeudella, mutta vaunun telin keskikohdassa havainnollistaen vaunun päässä ensimmäisessä kerroksessa matkustavan kokemia värähtelyjä. Kolmas mittapiste sijaitsee toisessa kerroksessa telin keskikohdassa, jolloin se kuvaa toisen kerroksen matkustajan kokemia värähtelyjä vaunun päädyssä.

Kun mittaustuloksia vertaillaan Liikenneviraston ohjeistamiin raja-arvoihin, tulee huomioida, että mittaustuloksien kiihtyvyysskuvaajissa ja saaduissa arvoissa ei ole käytetty kiihtyvyyksien suodatusta. Suodatuksen tarkoituksena on suodattaa ylimääräinen kohina ja ylimääräinen radan epätasaisuuksien tärinä pois ja sitä käytetään radalla kiihtyvyyksien arvoja mitattaessa. Mallinnuksessa rata on kuitenkin geometriavirheiden ulkopuolella täysin tasainen, eikä näin ollen sisällä normaalin radan mittaukseen liittyvää kohinaa, jonka suodattaminen olisi tarpeellista.

Simulointitapauksiksi on valittu nuolikorkeuspoikkeamia, korkeuspoikkeamia sekä kierouden arvoja, jotka on esitetty taulukossa 16. Nuolikorkeuspoikkeama poikittaissuuntaisena radan geometrian poikkeamana aiheuttaa erityisesti poikittaissuuntaista värähtelyä, korkeuspoikkeama taas pystysuuntaista värähtelyä ja radan kierous toimii sekä poikittaissuuntaista värähtelyä herätteenä. Nuolikorkeuspoikkeama on esitetty muodossa 1/km, koska näinä arvoina se on syötetty ohjelmaan. Arvot vastaavat luvussa 2.1.4 esitettyjä millimetrien arvoja.

Taulukko 16. Työssä tarkastellut geometriavirheiden arvot. Geometriavirheen arvot vaihtelevat nopeuden ja luokan mukaan.

| Tutkittavat virheet | | Nopeus km/h | | | | |
|---|--------------------|-------------|------|-------------------------|------|-----------|
| | | 80 | 120 | 160 | 200 | Yht |
| Nuolikorkeuspoikkeama 1/km | D-luokka | 0,28 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 12 |
| | *-luokka | 0,38 | 0,24 | 0,2 | 0,18 | |
| | Aallonpituus 20 m | 0,48 | 0,3 | 0,26 | 0,24 | |
| Korkeuspoikkeama mm | D-luokka | 8 | 6 | 5 | 4 | 12 |
| | *-luokka | 12 | 9 | 8 | 7 | |
| | Aallonpituus 5 m | 16 | 12 | 11 | 10 | |
| Kierous mm | D-luokka | 12 | 9 | 8 | 7 | 12 |
| | *-luokka | 15 | 12 | 11 | 9 | |
| | Aallonpituus 3,5 m | 18 | 15 | 14 | 11 | |
| Jäykkyys | | | | 5 mm (korkeuspoikkeama) | | 2 |
| | Aallonpituus 5 m | | | 50->15->50 kN/mm | | |
| Eri aallonpituudet mm Kierouspoikkeama | 3,5 m | | | 14 | | 6 |
| | 10 m | | | 14 | | |
| | 15 m | | | 14 | | |
| | 20 m | | | 14 | | |
| | 30 m | | | 14 | | |
| | 40 m | | | 14 | | |
| YHT Tapauksia | | | | | | 44 |

Geometriavirheet on syötetty ohjelmaan tekstitiedostona, johon voidaan määritellä radan geometria halutulla tarkkuudella. Radan geometrian muutos on määritetty sinikäyrän

muotoiseksi, jotta muutos vastaisi mahdollisimman hyvin radassa esiintyviä virheitä. Radassa geometriavirheet saattavat kuitenkin olla kulmikkaampia, jolloin kalustoon muodostuu todennäköisesti mallinnuksessa saatuja arvoja suurempia kiihtyvyyden arvoja.

Geometriavirheet on mallinnettu Vampireen syötettävien eri arvojen avulla. Nuolikorkeuspoikkeama on mallinnettu 20 metrin aallonpituudella tapahtuvan toisen kiskon poikittaissuuntaisena siirtymänä. Korkeuspoikkeama esitetään 5 metrin aallonpituudella tapahtuvana molempien kiskojen yhtäaikaisena korkeussuuntaisena poikkeamana. Kierouden aiheuttama virhe on esitetty 3,5 metrin aallonpituudella tapahtuvalla korkeussuuntaisella poikkeamalla vain toisella kiskolla, jolloin kalustoon aiheutuu myös poikittaissuuntainen heräte vaunun kallistuessa.

Työssä on tarkoitus tutkia myös jäykkyyksmuutosten vaikutusta kaluston kokemiin värähtelyihin. Koska radan jäykkyyden määrittäminen perustuu staattisesti kuormitetun radan painumaan ja radan jäykkyys määritetään radan taipumalla (Selig & Li 1994), voidaan jäykkyyksmuutoksen ajatella vastaavan tietyn suuruista geometriavirhettä kaluston kiihtyvyyksiä tarkasteltaessa. Kun tarkastellaan 11 t pyöräpainon aiheuttamaa taipumaa, saadaan 50 kN/mm jäykkyydellä 2,2 mm painuma ja 15 kN/mm jäykkyydellä 7,3 mm painuma. Näin ollen arvioitiin noin 5 mm korkeuspoikkeaman vastaavaan jäykkyyden muutosta 50 kN/mm jäykkyydestä 15 kN/mm jäykkyyteen, mikä taas vastaisi kohtalaisen jäykältä radalta pehmeikön päälle rakennetulle radalle siirtymistä. Näin voitiin vertailla jäykkyyksmuutoksien aiheuttamia kiihtyvyyksiä vastaavan geometriavirheen aiheuttamiin kiihtyvyyksiin.

Geometriavirheen aiheuttamia kiihtyvyyksiä tutkittaessa käytettiin aina Liikenneviraston ohjeissa määritettyjä aallonpituuksia kullekin geometriavirheelle (taulukko 16). Tämän lisäksi tutkittiin myös kierouden tarkasteluaallonpituudesta poikkeavien aallonpituuksien vaihtelun vaikutusta kaluston kiihtyvyyksien muodostumisessa ja mahdollisten ominaismuotojen heräämisen kannalta. Näin voidaan tutkia vaunussa mahdollisesti eri aallonpituuksilla herääviä ominaismuotoja. Ominaismuodon herätessä kiihtyvyydet voivat kasvaa suuremmiksi eivätkä ne vaimene yhtä nopeasti. Eri aallonpituuksien tarkastelua varten valittiin kierouden 14 mm poikkeama, jonka aallonpituudeksi otettiin 3,5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m ja 40 metriä. Koska kierous on poikkeama vain toisella kiskolla, se aiheuttaa kalustoon sekä pysty- että poikittaissuuntaisia värähtelyitä, jolloin eri ominaismuotojen herääminen voisi olla todennäköisempää.

8.2 Tulokset

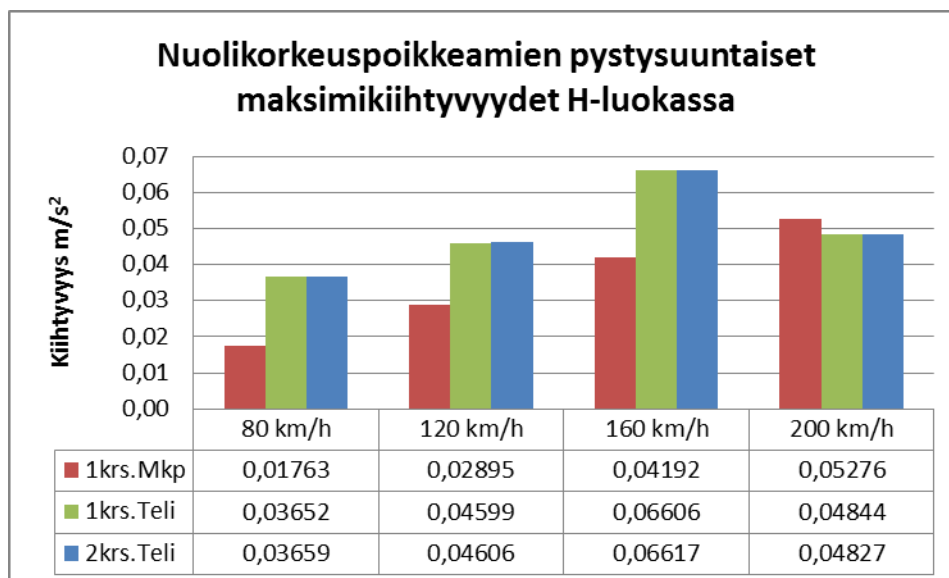
Tässä luvussa on esitelty eri simulointitapauksilla saatuja tuloksia, eli nuolikorkeuspoikkeaman, korkeuspoikkeaman ja kierouden geometriapoikkeamilla aiheutuneita kiihtyvyyksiä ja poikittaissuuntaisia siirtymiä. Tämän lisäksi vertaillaan jäykkyyksvaihtelun sekä geometriavirheen aiheuttamien kiihtyvyyksien eroja ja tutkitaan geometriavirheiden eri aallonpituuksien vaikutusta syntyviin kiihtyvyyksiin.

8.2.1 Nuolikorkeuspoikkeama

Nuolikorkeuspoikkeamana on simuloinnissa käytetty 20 metrin aallonpituudella tapahtuva toisen kiskon poikittaissuuntainen siirtymä, joita tarkastellaan D-, *- ja H-luokissa. Tapaukset on esitelty taulukossa 17. * ja D -luokissa pystysuuntaisten kiihtyvyyksien arvot jäävät alle $0,05 \text{ m/s}^2$ ja $0,03 \text{ m/s}^2$, jolloin ne eivät käy lähelläkään raja-arvojen ylittymistä (D-luokalla $1,5 \text{ m/s}^2$ ja *-luokalle $2,5 \text{ m/s}^2$). Tarkasteltaessa nuolikorkeuden aiheuttamia pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä huonoimmalla mahdollisella tilanteella eli kuvitteellisessa H-luokassa (kuva 39), jäävät kiihtyvyydet yhä alle $0,07 \text{ m/s}^2$ eli kauas *-luokalle asetetuista raja-arvoista. Kuvaajissa punainen kuvaa aina vaunun massakeskipisteessä eli ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevaa anturia, vihreä ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja sininen toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia.

Taulukko 17. Simuloinneissa nuolikorkeuspoikkeaman geometriavirheillä käytetyt poikkeaman arvot.

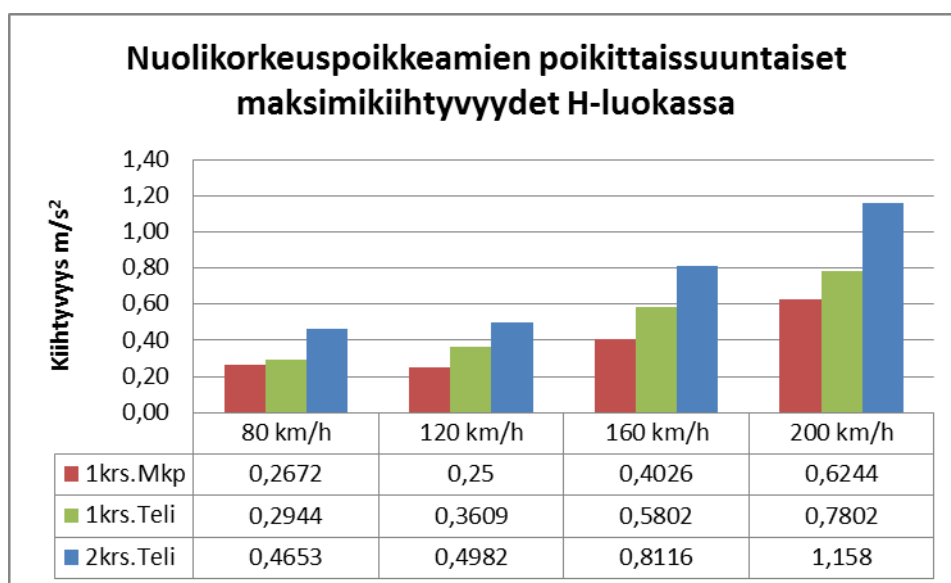
| Tutkittavat virheet | | Nopeus km/h | | | | |
|-------------------------------|----------|-------------|------|------|------|-----|
| | | 80 | 120 | 160 | 200 | Yht |
| Nuolikorkeuspoikkeama 1/km | D-luokka | 0,28 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 12 |
| | *-luokka | 0,38 | 0,24 | 0,2 | 0,18 | |
| Aallonpituus 20 m | H-luokka | 0,48 | 0,3 | 0,26 | 0,24 | |



Kuva 39. Nuolikorkeuspoikkeaman pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimi-arvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyksianturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. *-luokan raja-arvo on $2,5 \text{ m/s}^2$, johon tuloksia voidaan verrata.

Nopeudella 160 km/h kiihtyvyyden arvot ovat H-luokassa korkeammat kuin 200 km/h nopeudessa, mutta 160 km/h nopeudella myös epätasaisuuden arvot ovat suuremmat kuin 200 km/h nopeudella. H-luokan 160 km/h nopeudella ajettu epätasaisuus on myös ainoa nuolikorkeuspoikkeama, jossa vaunumassakeskipisteen kiihtyvyydet kasvavat vaunun telin kohdan kiihtyvyyksiä suuremmiksi, mikä voi viitata vaunun värähtelevän eri tavoin kuin muissa nuolikorkeuspoikkeamissa. Vastaavaa ei siis ole huomattavissa * ja D -luokissa. Muissa nuolikorkeuspoikkeaman tapauksissa vaunun telin kohdalta takaosasta mitatut kiihtyvyydet ovat hieman suuremmat kuin vaunun keskeltä mitatut arvot, kuten kuvaajasta 39 voidaan havaita.

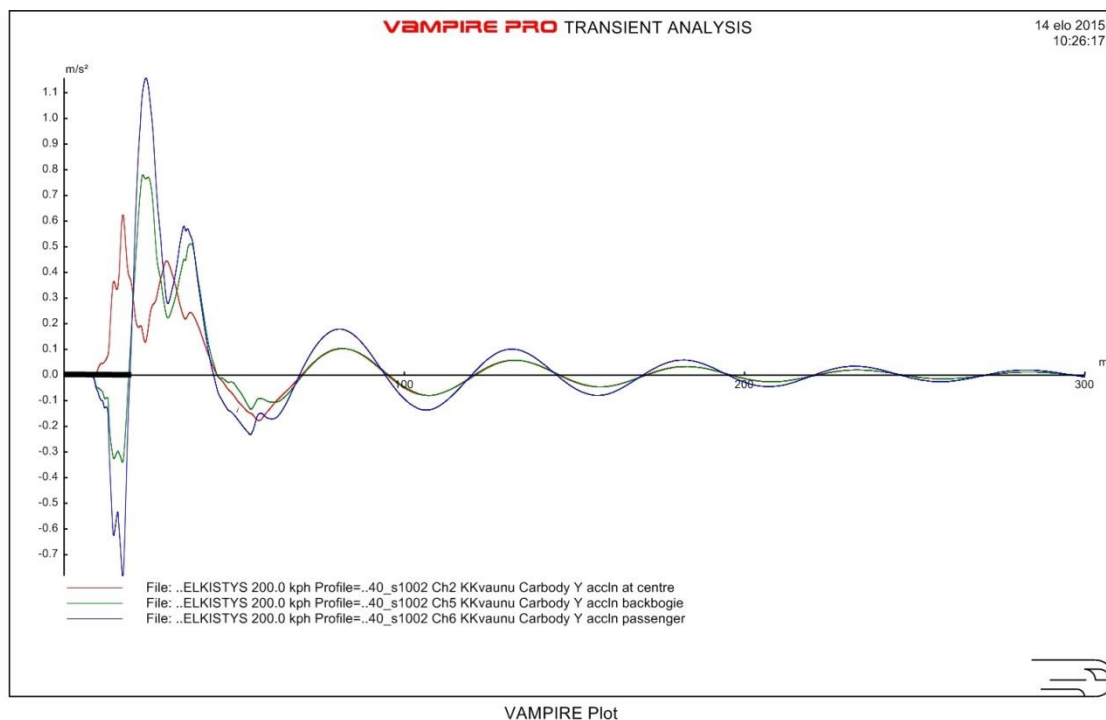
Nuolikorkeuspoikkeaman poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä tarkasteltaessa (kuva 40) huomataan telin kohdan kiihtyvyyksien varsinkin vaunun yläosassa kasvavan vaunun keskialueen kiihtyvyyksiä suuremmaksi. Mahdollisesti nuolikorkeuspoikkeama aiheuttaa näin ollen vaunussa lievää lower center roll -tyyppistä värähtelyä, jossa vaunun yläosa heiluu alaosaa enemmän. Tämän tyyppinen värähtelymuoto voi olla kaksikerrosvaunulle erityisen ongelmallinen sen tavanomaista suuremman korkeuden takia, jolloin matkustajat joutuvat kokemaan suurempia kiihtyvyyksiä toisessa kerroksessa. Kiihtyvyydet eivät kuitenkaan mallinnuksessa ylitä raja-arvoja jääden *-luokassa alle $0,9 \text{ m/s}^2$, D-luokassa alle $0,6 \text{ m/s}^2$ ja H-luokassa alle $1,2 \text{ m/s}^2$. Kaikkien luokkien kuvaajat ovat hyvin samankaltaiset.



Kuva 40. Nuolikorkeuspoikkeaman poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. Tuloksia voidaan verrata *-luokan raja-arvoon on $2,5 \text{ m/s}^2$,

Kuvassa 41 on esitetty poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittymistä 300 metrin matkalla, kun geometriavirhe tapahtuu sinikäyrän muotoisesti ensimmäisen 20 metrin aikana. Kaluston nopeus on 200 km/h ja geometriavirhe on suurin simuloinneissa käytetty eli H-

luokan epätasaisuus. Kaluston kiihtyvyydet alkavat erottua kuvaajassa noin puolessa välissä poikkeamaa eli 10 metrin kohdalla ensin vaunun keskikohdan kiihtyvyyksillä ja lähes samaan aikaan vaunun takaosan erisuuntaisella kiihtyvyydellä. Pienennettäessä vaunun nopeutta ja nuolikorkeuspoikkeamaa kuvaaja pysyy samankaltaisena, mutta ensimmäinen herätteen aiheuttama kiihtyvyyshuippu pienenee ja kuvaaja näin ollen tasoittuu. Tämän vuoksi poikkeaman aiheuttamia kiihtyvyyksiä havainnollistetaan H-luokan geometriavirheellä.



Kuva 41. Vaunun poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittyminen 300 metrin matkalla, kun H-luokan geometriavirhe tapahtuu ensimmäisen 20 m matkalla (tummennettuna) vaunun nopeuden ollessa 200 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa.

Pienet pystysuuntaisten kiihtyvyyksien arvot selittyvät nuolikorkeuspoikkeaman suunnalla, sillä poikkeama on täysin poikittaissuuntainen. Radan poikittaissuuntainen heitto aiheuttaa vaunulle enemmän poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä. Nyt mallinnettu sini-käyrän muotoinen poikkeama antaa kalustolle aikaa sopeutua poikkeamaan, kun todellisuudessa nuolikorkeuspoikkeama voi olla esimerkiksi hieman kulmamainen poikkeama. Tällöin kaluston saama heräte on äkkinäisempi, jolloin se ei ehdi mukautua muutokseen niin nopeasti. Tämän kaltainen nuolikorkeuspoikkeama antaisi todennäköisemmin suurempia poikittaissuuntaisia kiihtyvyyden arvoja, mikä voi olla ongelmallista korkealle kaksikerroksiselle vaunulle.

Nuolikorkeuspoikkeaman aiheuttamat siirtymät eivät ole kovinkaan suuria. Esimerkiksi 200 km/h nopeudessa H-luokan poikkeamalla poikittaissuuntainen siirtymä on 3 mm ja

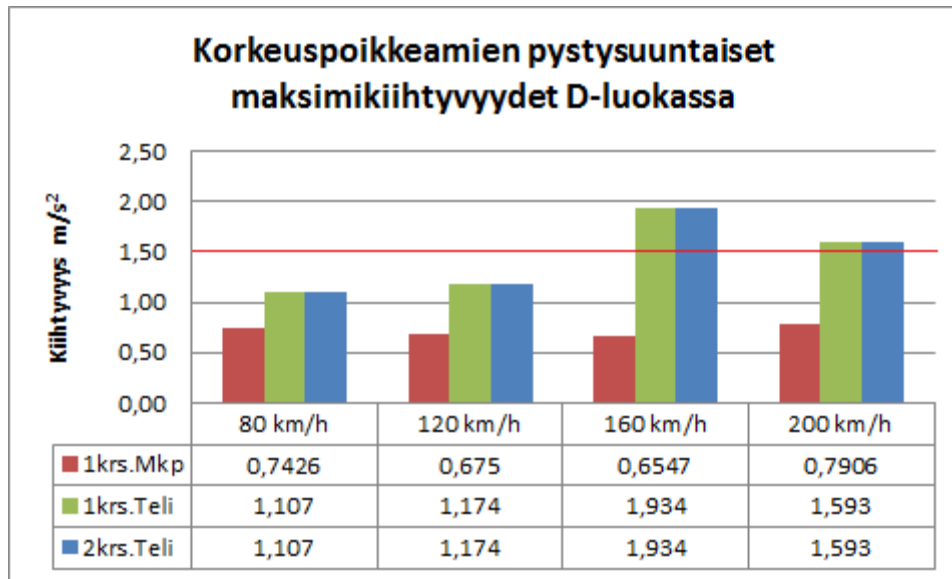
pystysuuntainen siirtymä on 0,1 mm telin kohdalla toisessa kerroksessa. Animaatiota tarkasteltaessa havaitaan vaunun heilahtelevan lower center roll -tyyppisesti. Näin ollen nuolikorkeuspoikkeama herättäneekä herkästi lower center roll -ominaismuodon.

8.2.2 Korkeuspoikkeama

Korkeuspoikkeamana on simuloinneissa käytetty molempien kiskojen yhtäaikaista pystysuuntaista poikkeamaa 5 metrin matkalla, joiden tarkemmat arvot on esitelty taulukossa 18. Geometriavirheen muodostamia kiihtyvyyksiä ja siirtymiä tarkastellaan luokissa D, * ja kuvitteellisessa suurimmassa luokassa H. Korkeuspoikkeaman pystysuuntaiset kiihtyvyyden arvot ylittävät suuremmilla nopeuksilla annetut kiihtyvyyden raja-arvot eli $1,5 \text{ m/s}^2$ D-luokassa ja $2,5 \text{ m/s}^2$ *- ja H-luokassa. Tarkasteltaessa D-luokassa eri nopeuksilla tapahtuvia kiihtyvyyksien arvoja (kuva 42) havaitaan, että 160 km/h ja 200 km/h nopeuksilla saavutetaan vaunussa telin kohdalla raja-arvot ylittäviä kiihtyvyyden arvoja. Koska vaunussa ensimmäisen ja toisen kerroksen telin kohdan sijaitsevat kiihtyvyyssanturit ovat pituus- ja poikittaissuunnassa sijainniltaan toisiaan vastaavia, saavat ne korkeuspoikkeaman aiheuttamilla kiihtyvyyksillä yhteneviä arvoja. Todennäköisesti kalusto siis värähtelee pitch -värähtelymuotoa muistuttavalla tavalla, jolloin vaunun päädyt saavuttavat keskiosaa suurempia kiihtyvyyksiä. 200 km/h vauhdissa kiihtyvyydet eivät kasva yhtä suuriksi, mikä voi johtua suuren nopeuden aiheuttamasta hitaudesta radan epätasaisuuden reagoimiseen, vaikka myös tällä nopeudella saadut kiihtyvyyden arvot ylittävät määritetyt raja-arvot.

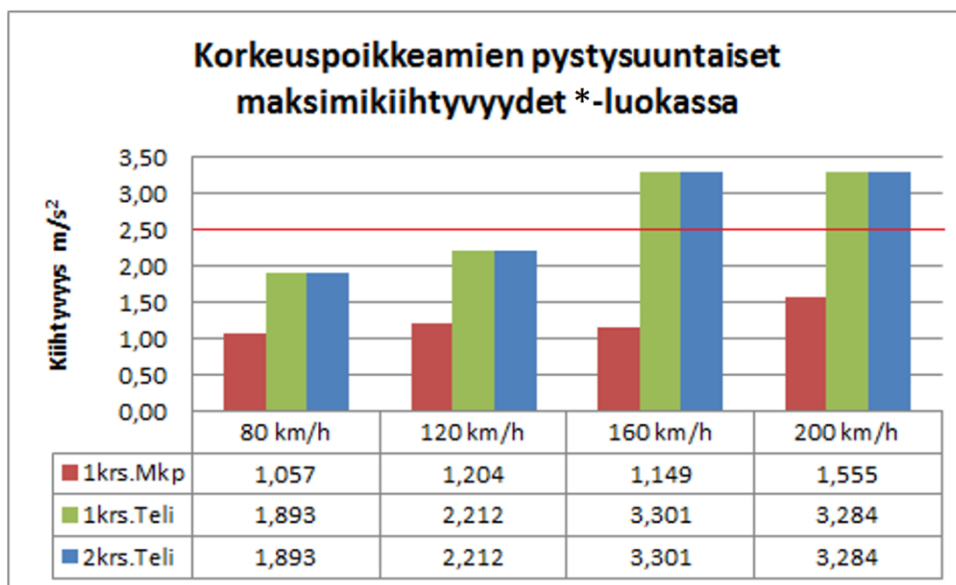
Taulukko 18. Simuloinneissa korkeuspoikkeaman geometriavirheillä käytetyt poikkeaman arvot.

| Tutkittavat virheet | | Nopeus km/h | | | | |
|---|----------|-------------|-----|-----|-----|-----------|
| | | 80 | 120 | 160 | 200 | Yht |
| Korkeuspoikkeama mm Aallonpituus 5 m | D-luokka | 8 | 6 | 5 | 4 | 12 |
| | *-luokka | 12 | 9 | 8 | 7 | |
| | H-luokka | 16 | 12 | 11 | 10 | |



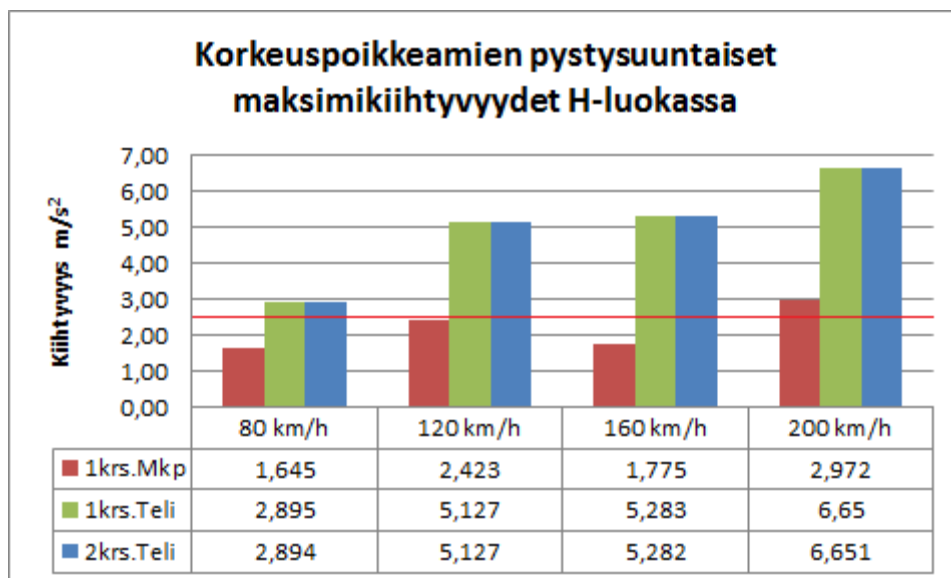
Kuva 42. Korkeuspoikkeaman pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. D-luokan raja-arvo on $1,5 \text{ m/s}^2$.

Myös *-luokan 160 km/h ja 200 km/h nopeuksilla saatavat arvot ylittävät oman luokkansa kiihtyvyyksille määritellyt raja-arvot huomattavasti, kuten kuvasta 43 voidaan nähdä. Nyt 200 km/h nopeudella saadaan samankaltaisia kiihtyvyydenarvoja kuin 160 km/h nopeudella. Tämä voi johtua poikkeavuuden kasvamisesta, sillä pienemmällä nopeudella geometriavirhe on suurempi kuin isommalla nopeudella. Näin suuremmasta nopeudesta huolimatta kalusto ehtii reagoida radassa olevaan epätasaisuuteen.



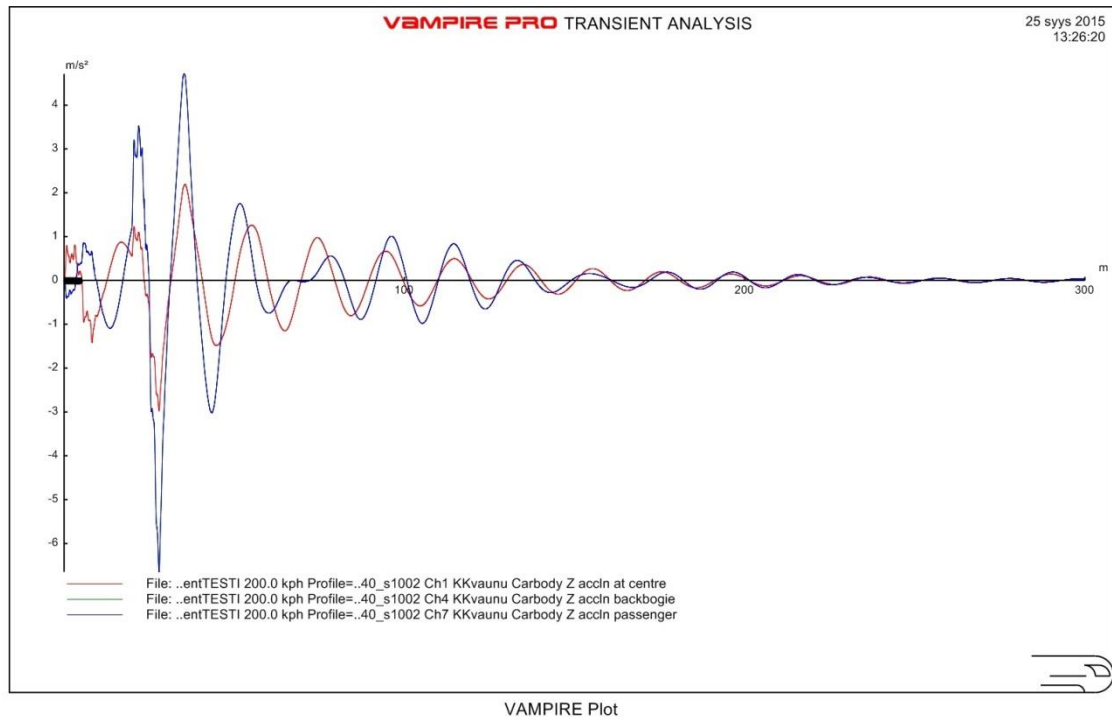
Kuva 43. Korkeuspoikkeaman pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. *-luokan raja-arvo on $2,5 m/s^2$.

Kuvassa 44 on esitelty, mitä arvoja kuvitteellisella suurimman epätasaisuuden H-luokalla saataisiin ja paljonko nämä arvot ylittävät *-luokalle määritellyn kiihtyvyyden arvot. Näin suuren poikkeaman arvolla kiihtyvyyden arvot ylittyvät kaikilla mitatuilla nopeuksilla. Nopeuksilla 120 km/h ja 160 km/h kiihtyvyydet ovat jopa kaksi kertaa suuremmat kuin raja-arvo sallisi ja 200 km/h arvolla päästään lähes kolminkertaiseen arvoon. Ylitykset ovat siis hyvin suuria.

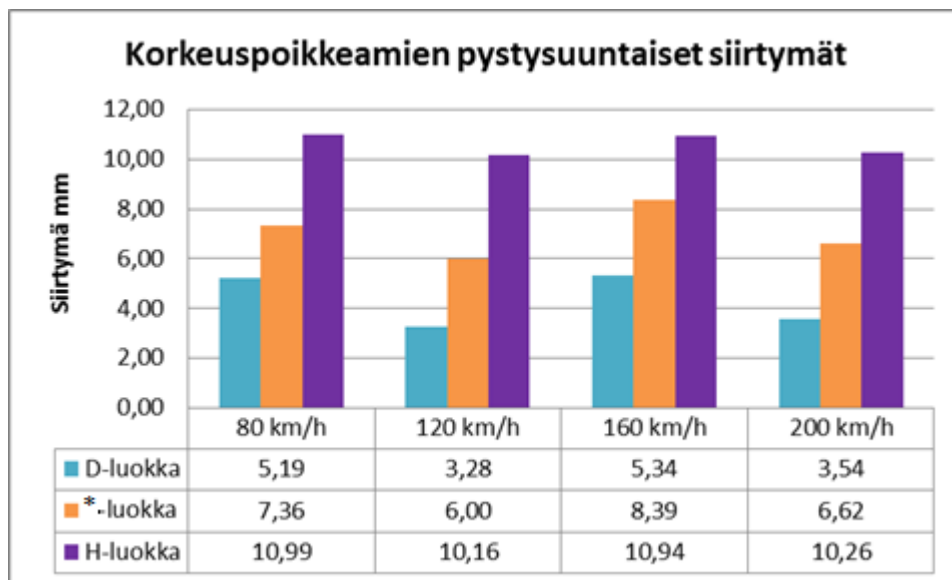


Kuva 44. Korkeuspoikkeaman pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. Tuloksia voidaan verrata *-luokan raja-arvoon on $2,5 \text{ m/s}^2$,

Kuvassa 45 on esitetty H-luokan korkeuspoikkeaman aiheuttamien kiihtyvyyksien kehittymistä 300 metrin matkalla vaunun nopeuden ollessa 200 km/h. Geometriavirhe alkaa nollakohdasta ja kestää 5 metriä. Noin 20 metrin jälkeen värähtelyn kiihtyvyydet kasvavat suurimmilleen alkaen tasoittua 50 metrin jälkeen. Pienemmillä nopeuksilla ja geometriavirheen arvoilla kiihtyvyyden maksimiarvot pienenevät ja tasoittuvat, mutta muuten kuvaajat ovat samankaltaisia. Koska telin kohdalta mitatut kiihtyvyydet ovat yhtä suuret toisessa kerroksessa ja alemmassa kerroksessa, ovat mittapisteiden 2 krs. Teli (sininen viiva) ja 1 krs. Teli (vihreä viiva) kuvaajat täysin samassa kohdassa. Kun tarkastellaan kaluston siirtymiä vaunussa telin kohdalta toisessa kerroksessa, havaitaan pystysuunnassa merkittäviä siirtymiä varsinkin H-luokassa (kuva 46).



Kuva 45. Vaunun pystysuuntaisten kiihtyvyyksien kehittyminen 300 metrin matkalla, kun H-luokan geometriavirhe sijaitsee 5 m matkalla (tummennettu) vaunun nopeuden ollessa 200 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajassa päällekkäin.



Kuva 46. Toisen kerroksen taaimmaisen telin kohdalla sijaitseman matkustajan kokemat siirtymät korkeuspoikkeamien takia eri nopeuksilla ja luokissa.

H-luokassa pystysuuntaiset siirtymät ovat yhden sentin luokkaa kaikilla nopeuksilla. *-luokan suurin pystysuuntainen siirtymä saavutetaan 160 km/h nopeudessa, jolloin se on hieman alle sentin luokkaa. D-luokan siirtymät ovat aina alle 6 millimetriä. Siirtymät

näyttävät pysyvän nopeudesta riippumatta hyvin samalla tasolla, vaikka korkeuspoikkeaman suuruus vaihtelee merkittävästi. Hitaammille nopeuksilla kaluston jousitus pystyy kompensoimaan radan epätasaisuuksia, jolloin matkustajalle välittyvä siirtymä on epätasaisuutta pienempi. Kuitenkin 200 km/h nopeudessa geometriavirheet välittyvät lähes suoraan matkustajalle, sillä kalustossa tapahtuvat pystysuuntaiset siirtymät ovat lähestulkoon samansuuruiset kuin kiskossa esiintyvät korkeuspoikkeamat. Poikittaissuuntaiset siirtymät ovat hyvin pieniä pysyen alle 0,05 millimetrissä.

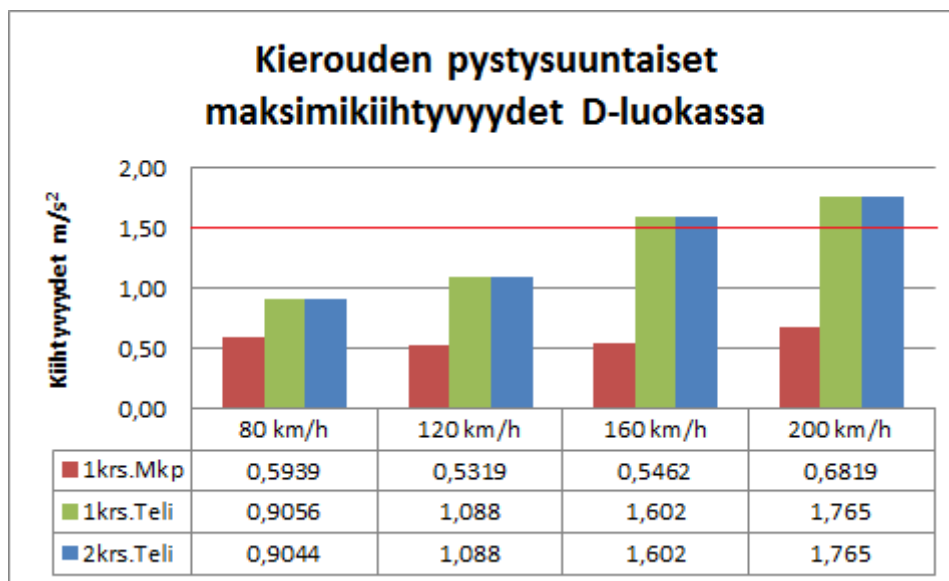
Kuvaajien perusteella korkeuspoikkeaman kiihtyvyydet ovat ainakin kaksikerroksisella vaunulla korkeuspoikkeamien raja-arvojen määrittämisessä rajoittava tekijä. Tällöin pienikin korkeuspoikkeaman arvon kasvu aiheuttaa myös selvän kiihtyvyyden kasvun kaluston pystysuunnassa. Poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet sen sijaan pysyvät korkeuspoikkeamien tapauksissa kaikilla luokilla ja nopeuksilla alle $0,02 \text{ m/s}^2$, jolloin ne eivät käytännössä aiheuta juurikaan poikittaissuuntaista kiihtyvyyttä. Koska korkeuspoikkeama on kummallakin kiskolla oleva yhdenmukainen pystysuuntainen poikkeama, poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet pysyvät oletetusti pieninä. Vaunun siirtymät riippuvat korkeuspoikkeaman suuruudesta ja kaluston nopeudesta, eikä korkeuspoikkeaman aiheuttama heilunta näytä saavan aikaan epätasaisuutta suurempaa siirtymää vaunussa.

8.2.3 Kierous

Kieroutena on simuloinneissa käytetty toisen kiskon pystysuuntainen poikkeama 3,5 metrin matkalla. Geometriavirheen muodostamia kiihtyvyyksiä ja siirtymiä tarkastellaan luokissa D, * ja kuvitteellisessa luokassa H, joiden epätasaisuuksien arvot on esitelty taulukossa 19. D-luokassa kierouden pystysuuntaiset kiihtyvyydet ylittävät raja-arvot eli $1,5 \text{ m/s}^2$ jopa $1,765 \text{ m/s}^2$ kiihtyvyyden arvolla (kuva 47). D-luokassa raja-arvot ylittyvät vain 160 km/h ja 200 km/h nopeuksilla. *-luokan geometriavirheillä raja-arvojen ylityksiä ei tapahdu, sillä raja-arvo on $2,5 \text{ m/s}^2$, joka on D-luokan raja-arvoa suurempi. *-luokassa suurimmat kiihtyvyydet saavutetaan 160 km/h nopeudella, jolloin vaunun telin kohdan kiihtyvyysanturit saavuttavat noin $2,3 \text{ m/s}^2$ pystykiihtyvyyden lähestyen raja-arvoa.

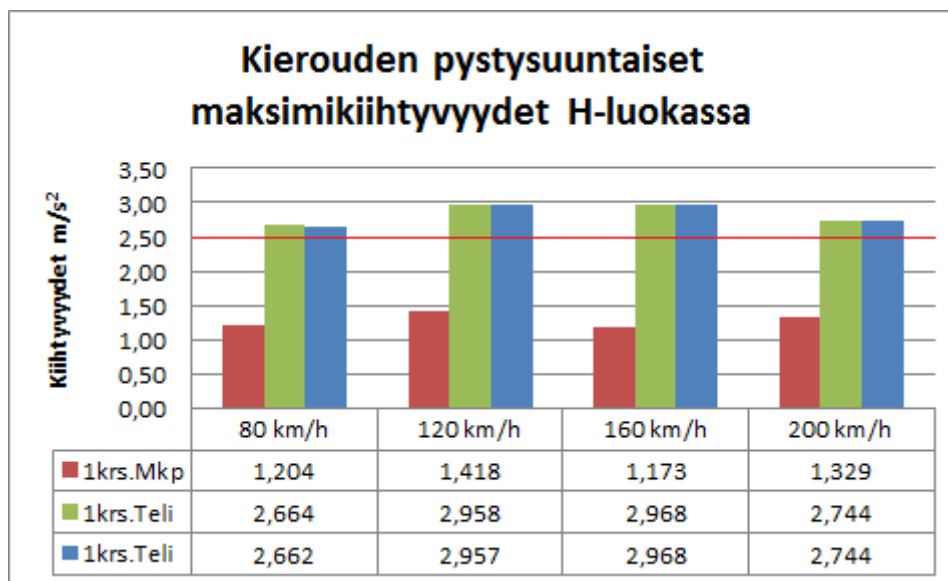
Taulukko 19. Simuloinneissa kierouden geometriavirheillä käytetyt poikkeaman arvot.

| Tutkittavat virheet | | Nopeus km/h | | | | |
|-------------------------------------|----------|-------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 80 | 120 | 160 | 200 | Yht |
| Kierous mm Aallonpituus 3,5 m | D-luokka | 12 | 9 | 8 | 7 | 12 |
| | *-luokka | 15 | 12 | 11 | 9 | |
| | H-luokka | 18 | 15 | 14 | 11 | |



Kuva 47. Kierouden aiheuttamia pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. D-luokan raja-arvo on $1,5 \text{ m/s}^2$.

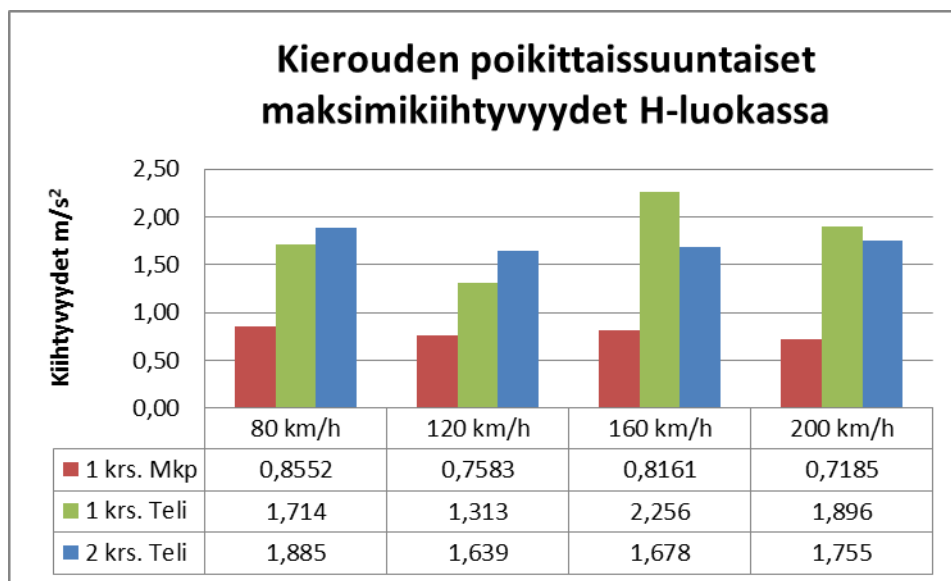
H-luokan geometriavirheen aiheuttamat pystysuuntaiset kiihtyvyydet ylittävät *-luokalle asetetut raja-arvot eli $2,5 \text{ m/s}^2$ (kuva 48) kaikilla nopeuksilla. Pystysuuntaisissa kiihtyvyyksissä suurimmat arvot saadaan 120 km/h ja 160 km/h nopeuksilla, jolloin 200 km/h nopeus on mahdollisesti jo niin suuri, että kaluston jousitus reagoi 3,5 metrin mittaiseen epätasaisuuteen eritavoin. Kuitenkin myös 200 km/h ja 80 km/h nopeudella aiheutuvat kiihtyvyydet ylittävät *-luokalle asetetut raja-arvot. Raja-arvojen ylitys tapahtuu aina vaunun telin kohdan ensimmäisen ja toisen kerroksen kiihtyvyyssantureissa, kun taas vaunun keskikohdan kiihtyvyydet pysyvät reilusti raja-arvoja pienempinä.



Kuva 48. Kierouden aiheuttamia pystysuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vaunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vaunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. Tuloksia voidaan verrata *-luokan raja-arvoon on $2,5 \text{ m/s}^2$,

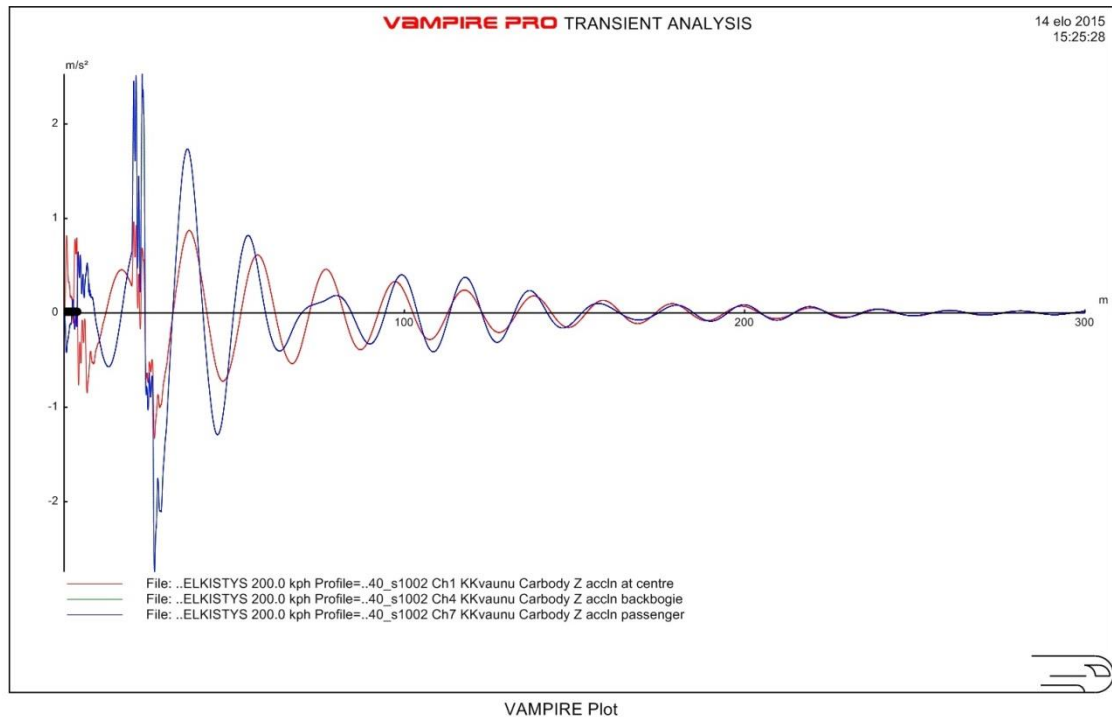
Kierouden aiheuttamien pystysuuntaisia maksimikihtiyyden kuvaajia tarkastellessa huomataan vaunun telin kohdan kiihtyvyyksien olevan molemmissa kerroksissa lähes samanarvoiset, kun taas vaunun keskikohdan kiihtyvyydet ovat aina huomattavasti pienemmät. Tämä voi viitata vaunun heilahtelevan pitch -värähtelymuodossa, jolloin vaunun päädyt saavuttavat keskikohtaa suuremman kiihtyvyyden.

Kierouden aiheuttamat poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet eivät ylitä missään luokassa raja-arvoja. Lähimpänä raja-arvojen ylitystä ollaan D-luokassa, jossa korkein arvo saavutetaan 160 km/h nopeudella ensimmäisen kerroksen telin kohdalla ($1,378 \text{ m/s}^2$), mikä on jo lähellä raja-arvoa $1,5 \text{ m/s}^2$. Suurimmat kiihtyvyydet saavutetaan H-luokassa (kuva 49), mutta *-luokan raja-arvot eivät siitä huolimatta ylity. Suuremmilla nopeuksilla takimmaisesta telin alemman mittapisteen kiihtyvyys on ylempää mittapistettä suurempi, mikä voi viitata kaluston heilahtelevan eri tavoin suuremmilla nopeuksilla. Pienemmillä nopeuksilla toisen kerroksen mittapisteen kiihtyvyys on taas alemmaa mittapistettä suurempi. Poikittaissuuntaisen kiihtyvyyden kuvaajat ovat hyvin samankaltaiset kierouden eri luokilla, joten muita kuvaajia ei esitetä tässä työssä.



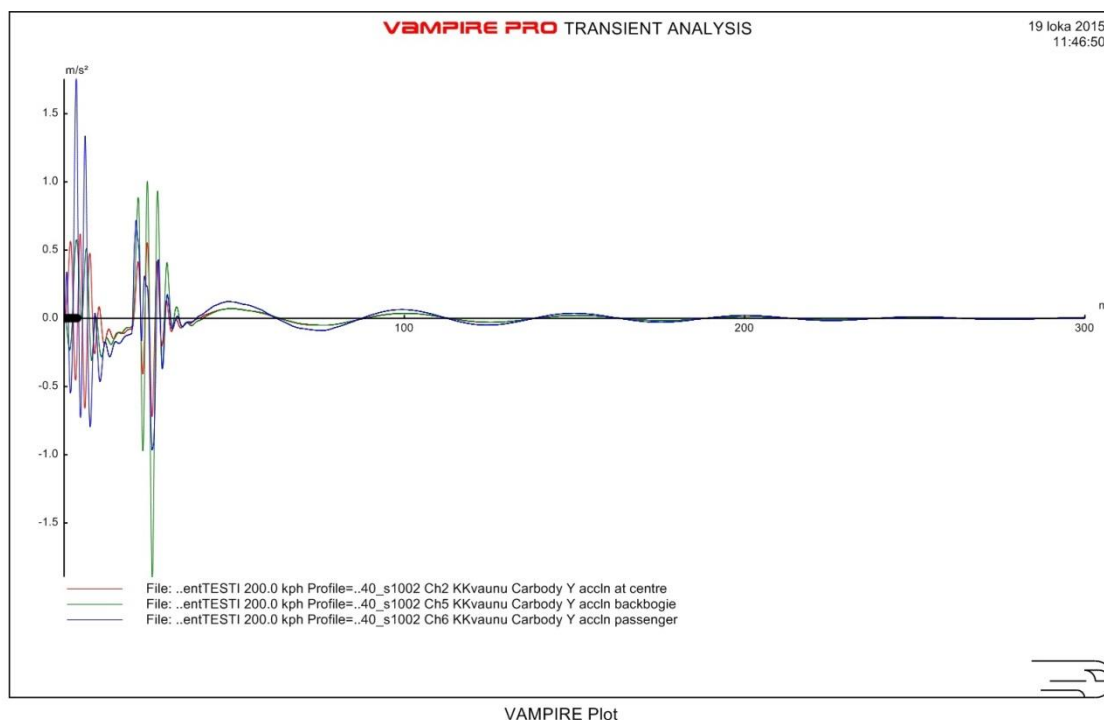
Kuva 49 Kierouden aiheuttamia poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksien maksimiarvoja vauunun eri kohdissa. 1 krs. Mkp kuvaa vauunun massakeskipisteessä sijaitsevaa kiihtyvyyssanturia, joka sijoittuu ensimmäiseen kerrokseen. 1 krs. Teli kuvaa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia ja 2 krs. Teli toisessa kerroksessa telin kohdalla sijaitsevaa anturia. Tuloksia voidaan verrata *-luokan raja-arvoon on $2,5 \text{ m/s}^2$,

Kuvassa 50 on esitelty H-luokan kierouspoikkeaman aiheuttamien pystysuuntaisten kiihtyvyyksien kehittymistä 300 metrin matkalla 200 km/h ajonopeudella. Kierouspoikkeama tapahtuu 3,5 metrin matkalla, jonka jälkeen värähtely saavuttaa maksimikihtyvyytensä noin 20 metrin kohdalla. Alemmilla nopeuksilla kiihtyvyysskuvaaja pysyy hyvin samankaltaisena, mutta kiihtyvyyden maksimit tasoittuvat. Koska taaempaan kulkevan telin kohdalta mitatut vauunun pystysuuntaiset kiihtyvyydet ovat yhtä suuret toisessa kerroksessa ja alemmassa kerroksessa, ovat mittapisteiden 2 krs. Teli (sininen viiva) ja 1 krs. Teli (vihreä viiva) kuvaajat täysin samassa kohdassa.



Kuva 50. Kierouden aiheuttamien vaunun pystysuuntaisten kiihtyvyyksien kehittyminen 300 metrin matkalla 200 km/h, kun H-luokan geometriavirhe tapahtuu 3,5 metrin (tummennettu) matkalla. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajassa päällekkäin.

Kuvassa 51 esitetään poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittymistä 300 metrin matkalla 200 km/h ajonopeudella ja luokan H kierouspoikkeaman arvolla. Kuvaajasta voidaan erottaa kaksi eri osaa kiihtyvyyksien maksimiarvoille. Ensimmäisessä osassa suurimman kiihtyvyyden saavuttaa telin kohdalta toisen kerroksen mitta-anturi, kun taas toisessa osassa suurimman arvon saa telin kohdalta ensimmäisen kerroksen mitta-anturi. Kierouden kaltaiseen poikkeamaan vaunu luonnollisesti kallistuessaan saa toisen kerroksen mittapisteellä suurempia kiihtyvyyden arvoja. Muilla nopeuksilla poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet noudattelivat kuvaajaa 51, mutta maksimiarvot olivat pienemmät ja huommin erottuvat.

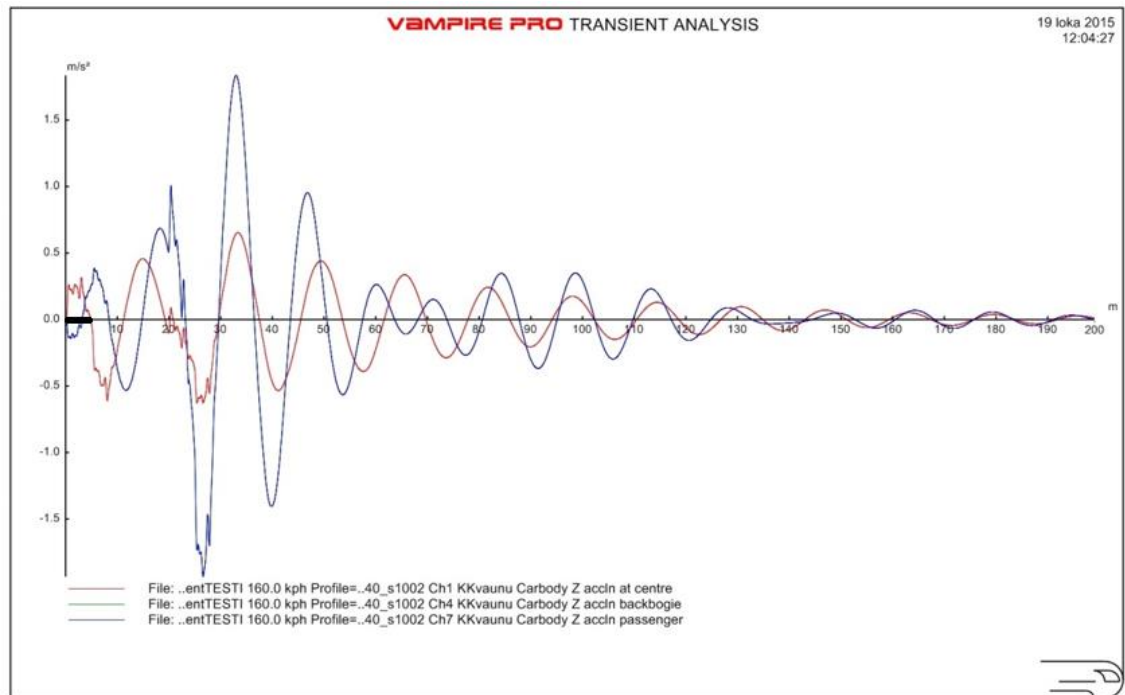


Kuva 51. Kierouden aiheuttamien vaunun poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittyminen 200 km/h nopeudessa 300 metrin matkalla, kun H-luokan geometriavirhe tapahtuu 3,5 metrin (tummennettuna) matkalla. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa.

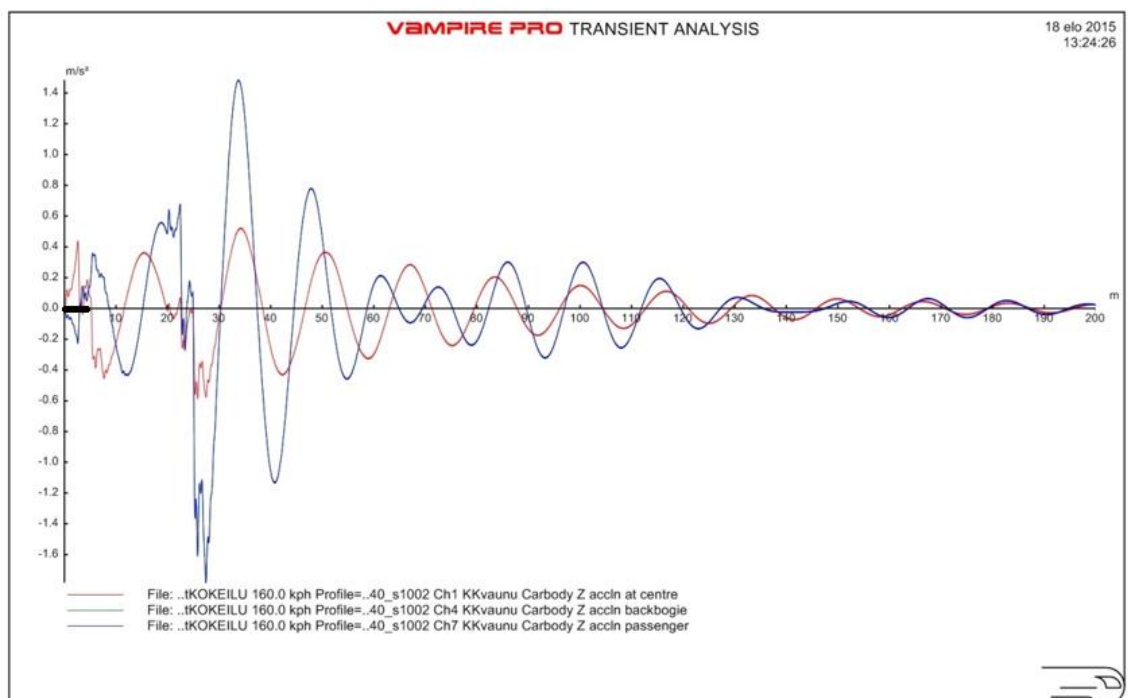
Kiihtyvyysskuvaajan 51 kiihtyvyyksien maksimiarvojen kahta rykelmää tarkasteltaessa huomataan, että ensimmäisessä rykelmässä korostuvat telin kohdan toisen kerroksen kiihtyvyydet ja toisessa rykelmässä ensimmäisen kerroksen kiihtyvyydet. Tällöin vaunu heilahtaa epätasaisuuden kohdalla ensin lower center roll -tyyppisesti, jolloin toinen kerros saa suuria kiihtyvyyksiä. Tämän jälkeen telin kohdalla ensimmäinen kerros saavuttaa suurimmat kiihtyvyydet toisen kerroksen ja vaunun keskipisteen saavuttaessa hitaampia kiihtyvyyksiä. Animaatiota tarkasteltaessa 80 km/h nopeudessa kalusto heilahtelee selkeästi lower center roll - tyyppisesti, jossa yläosan kiihtyvyys on alaosaa suurempi. 160 km/h nopeudessa heilahtelu ei enää selvästi ilmennä mitään tiettyä ominaisvärähtelyä.

8.2.4 Jäykkyysvaihtelu

Myös radan jäykkyysvaihtelu aiheuttaa kirjallisuusselvityksen mukaan kalustossa merkittäviä värähtelyitä. Vampire-mallilla voidaan tutkia radan jäykkyysmuutosten vaikutusta radan kiihtyvyyksiin muuttamalla radan jäykkyysmuutosten arvoja. Radan jäykkyysvaihtelujen aiheuttamat kiihtyvyydet ovat rinnastettavissa tietynlaisen epätasaisuuden aiheuttamiin kiihtyvyyksiin. Kuvassa 52 on esitetty jäykkyysmuutoksen ja kuvassa 53 sitä likimain vastaavan geometriavirheen aiheuttamien kiihtyvyyksien kehittymistä kalustossa. Jäykkyysmuutos on 50 kN/mm arvosta 15 kN/mm arvoon ja takaisin 5 metrin matkalla, mikä vastaa 5 mm korkeuspoikkeamaa.



Kuva 52. Vaunun värähtely 5 metrin (tummennettuna) aallonpituuden ja 5 mm korkean korkeuspoikkeaman aiheuttamana 200 metrin matkalla 160 km/h nopeudessa.



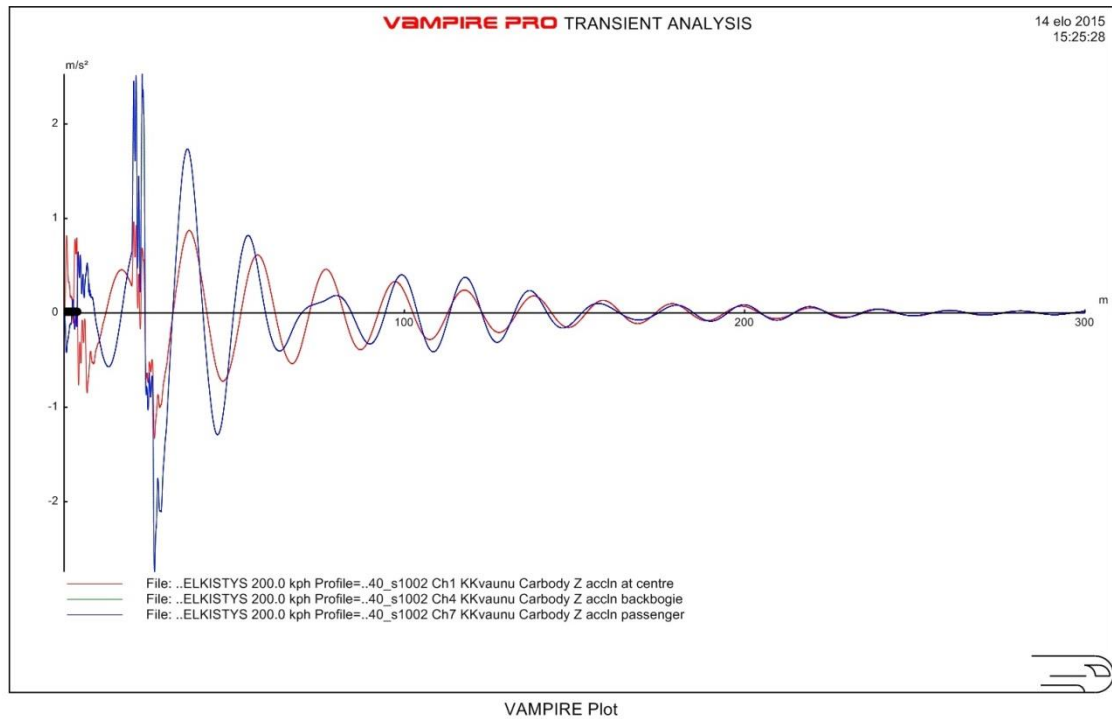
Kuva 53. Vaunun värähtely radan jäykkyyden muuttuessa 50 kN/mm jäykkyydestä 15 kN/mm jäykkyyteen ja takaisin 5 metrin matkalla 160 km/h nopeudessa.

Kuvaajien punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajissa päällekkäin.

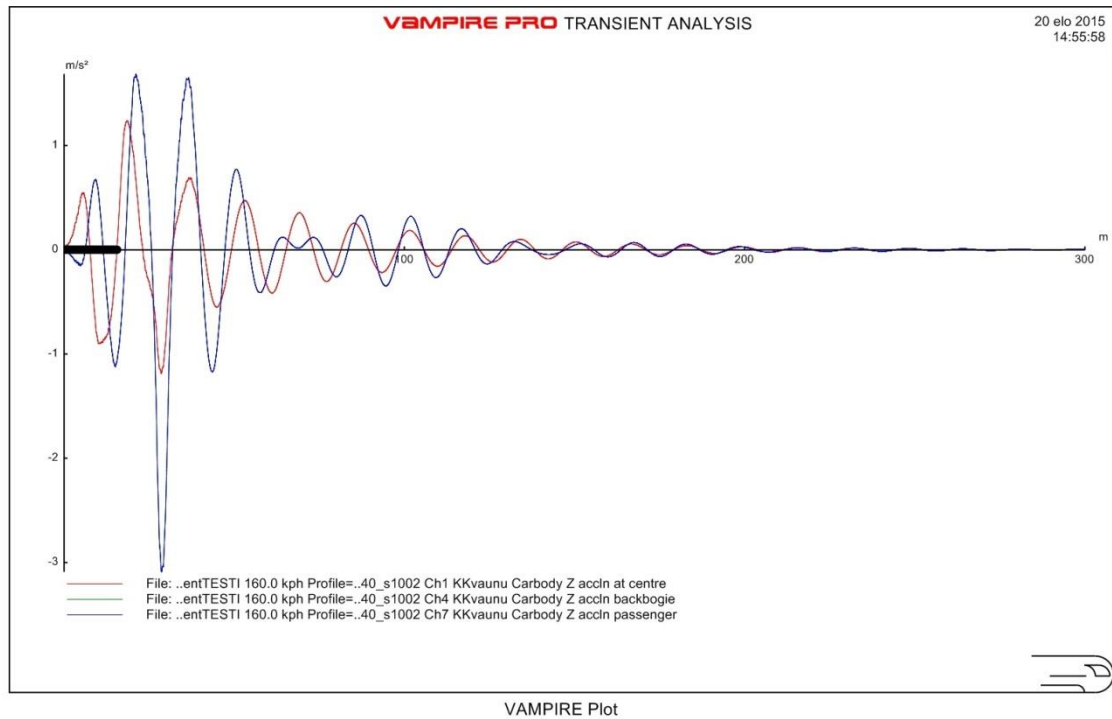
Kuvaajista nähdään geometriavirheen ja jäykkyysmuutoksen aiheuttamien kiihtyvyyksien vastaavan hyvin pitkälti toisiaan. Korkeuspoikkeaman arvoilla saadaan hieman suurempia pystysuuntaisen ja poikittaissuuntaisen kiihtyvyyden arvoja kuin jäykkyysmuutoksella. Kiihtyvyydet kehittyvät samankaltaisesti, joten jäykkyysmuutosten voidaan todeta vastaavan korkeuspoikkeamilla aikaansaattavia kiihtyvyyksiä ainakin Vampire-ohjelmalla mallinnettaessa. Tämän johdosta tässä työssä ei tarkastella radan jäykkyyden muutoksia erikseen, vaan keskitytään epätasaisuuksien tarkasteluun.

8.2.5 Epätasaisuuksien eri aallonpituudet

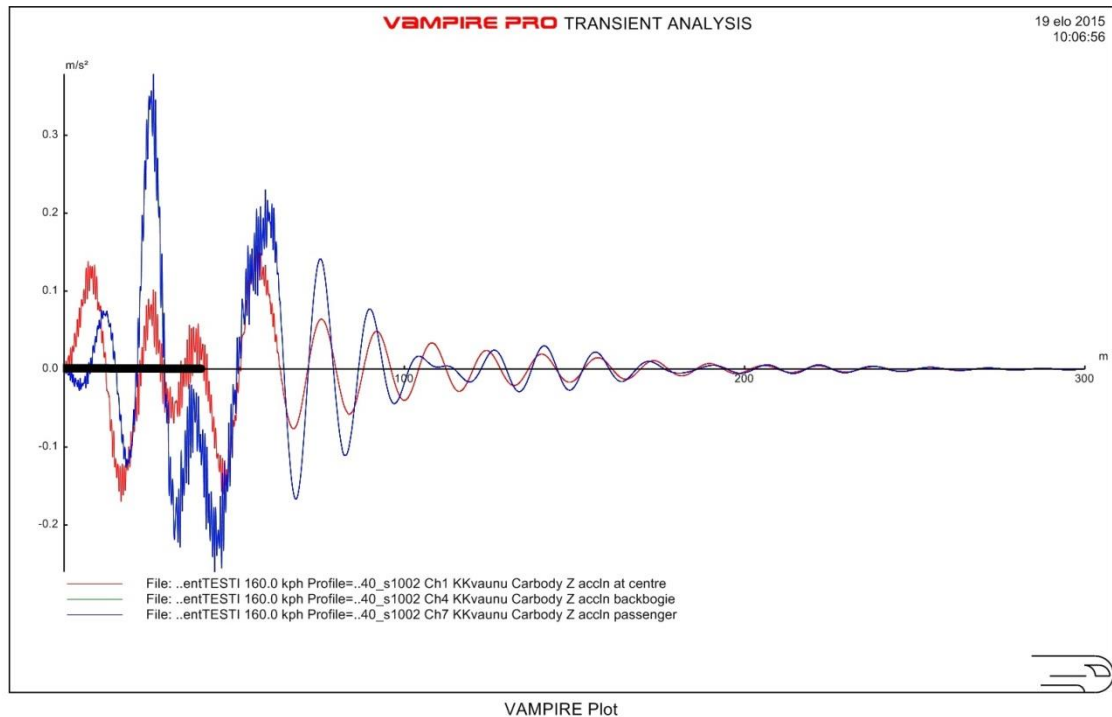
Epätasaisuuden aallonpituus voi vaikuttaa kaluston värähtelyn muotoon, mikä vaikuttaa kaluston eri osien kiihtyvyyksiin. Tämä voi olla merkittävässä asemassa kaksikerroksisella vaunulla, jos yläkerran kiihtyvyydet kasvavat alakertaa suuremmiksi aiheuttaen näin yläkerran matkustajille epämukavuutta. Kierouden geometriavirheen aiheuttaa sekä pysty- että vaakasuuntaisia kiihtyvyyksiä, joten aallonpituuden vaikutuksen tarkasteluun valittiin kierouden virhe 14 mm poikkeamalla ja 160 km/h nopeudella, mikä on kuvitteellisen H-luokan virhe. Kuvissa 54, 55 ja 56 on esitetty eri aallonpituuksien eli 3,5 m, 15 m ja 40 metrin aikaansaamat kaluston pystysuuntaiset kiihtyvyydet ja niiden kehittyminen ja kuvassa 57 on esitetty pystysuuntaisten maksimikiihtyvyyksien kehittyminen eri aallonpituuksien kierousvirheillä.



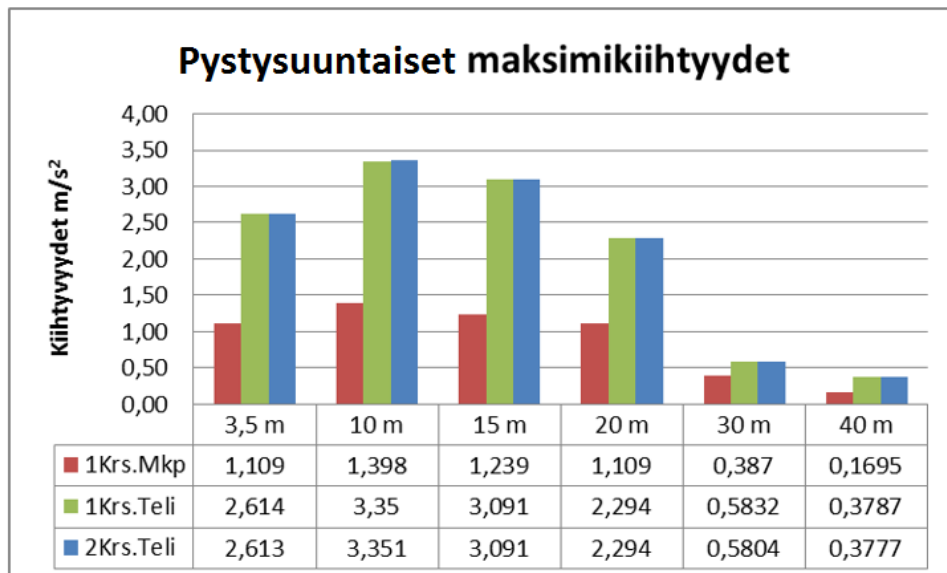
Kuva 54. Vaunun pystysuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 3,5 m (matka tummennettu). Virhe on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajassa päällekkäin.



Kuva 55. Vaunun pystysuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 15 m (matka tummennettu). Virhe on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajassa päällekkäin.

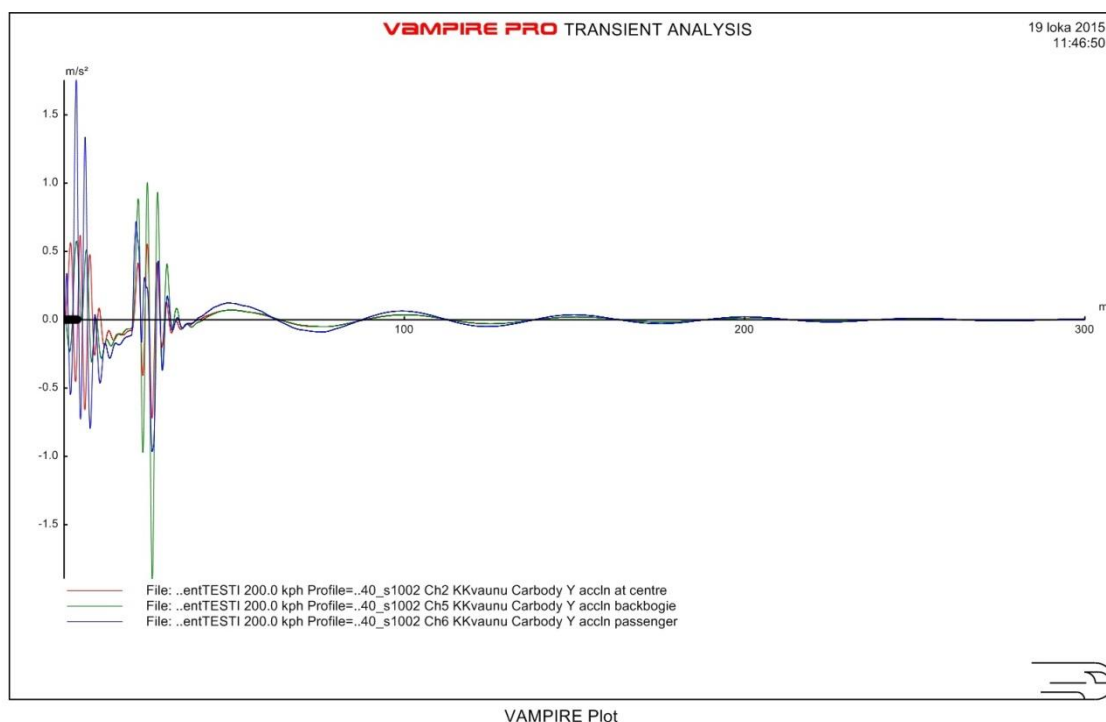


Kuva 56. Vaunun pystysuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 40 m (matka tummennettu). Virhe on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa. Sininen ja vihreä viiva menevät kuvaajassa päällekkäin.

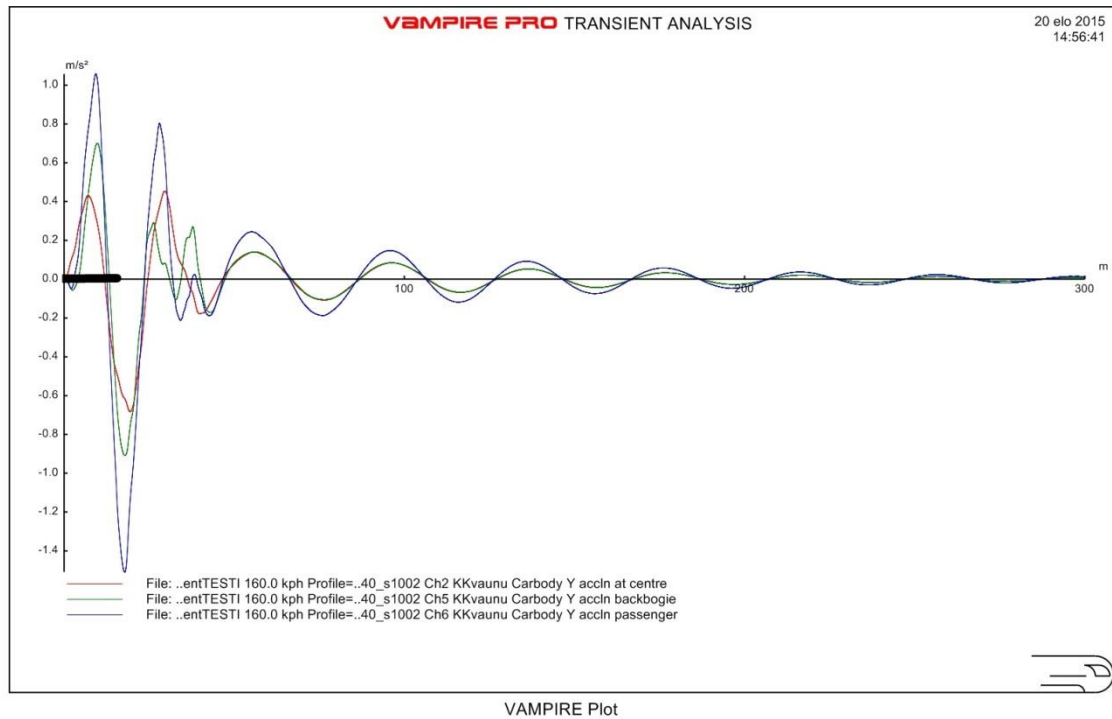


Kuva 57. Vaunun pystysuuntaisten maksimikiihtyvyyksien kehittyminen epätasaisuuden erilaisilla aallonpituuksilla. Punainen pylväs kuvaa vaunun massakeskipisteen, vihreä ensimmäisen kerroksen telin ja sininen toisen kerroksen telin kohdan kiihtyvyyksiä.

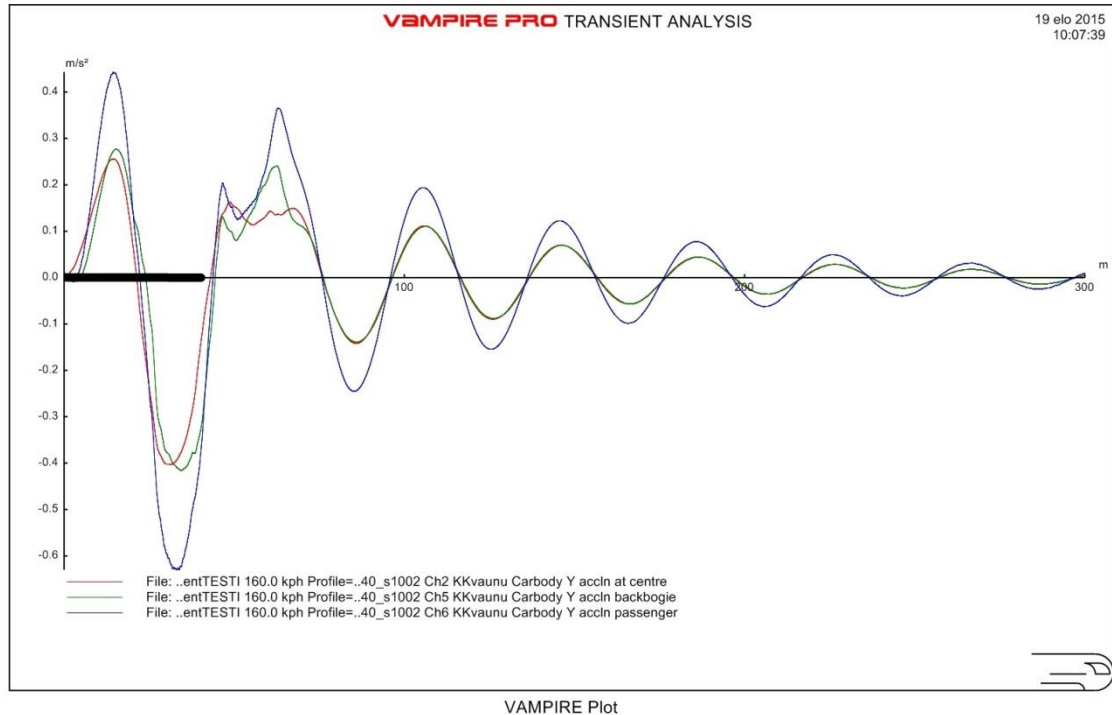
Kuvista nähdään kiihtyvyyksien pienenevän epätasaisuuden aallonpituuden kasvaessa, kun kalustolla on enemmän aikaa reagoida kallistuksen muutokseen. Kuitenkin kymmenen metrin geometriavirheen aallonpituudella kiihtyvyydet ovat 3,5 metrin aallonpituutta suurempia, mikä todennäköisesti johtuu vaunun erilaisesta heränteestä värähtelymuodosta. Kuvaajista nähdään vaunun telin kohdalla sijaitsevien kiihtyvyysanturien kiihtyvyyden olevan suurempi kuin vaunun keskellä. Vaunun päädyn ja keskipisteen kiihtyvyydet kuitenkin lähenevät toisiaan aallonpituuden pidentyessä. Kuvissa 58, 59 ja 60 on esitetty poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittyminen kierouden eri aallonpituuden geometriavirheen ja kuvassa 61 esitellään poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien maksimiarvojen muutosta.



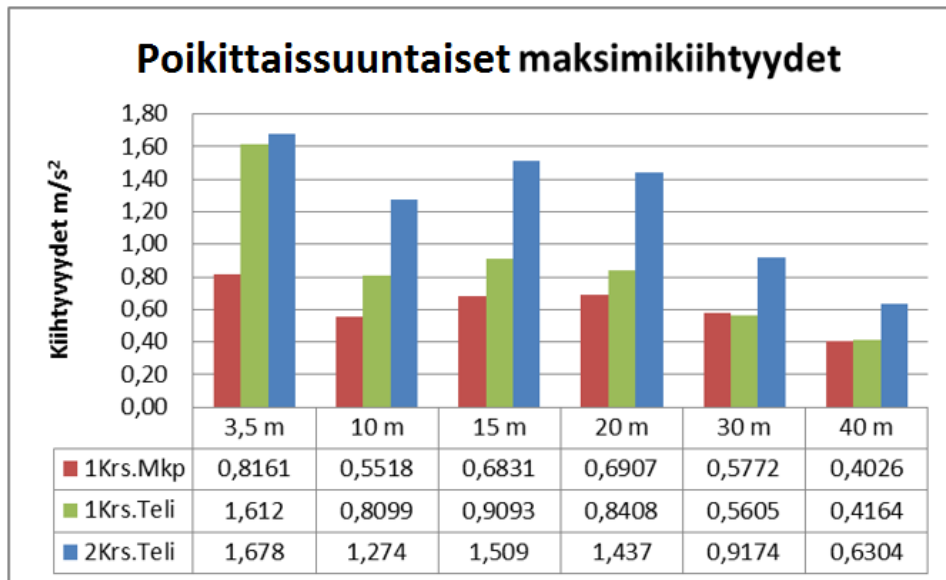
Kuva 58. Vaunun poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 3,5 m (matka tummennettu). Epätasaisuus on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa.



Kuva 59. Vaunun poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 15 m (matka tummennettu). Epätasaisuus on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa.



Kuva 60. Vaunun poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet geometriavirheen aallonpituuden ollessa 40 m (matka tummennettu). Epätasaisuus on 14 mm ja nopeus 160 km/h. Kuvaajan punainen väri on vaunun massakeskipisteen kiihtyvyys, vihreä vaunun takaosan kiihtyvyys ensimmäisessä kerroksessa ja sininen vaunun takaosan kiihtyvyys toisessa kerroksessa.

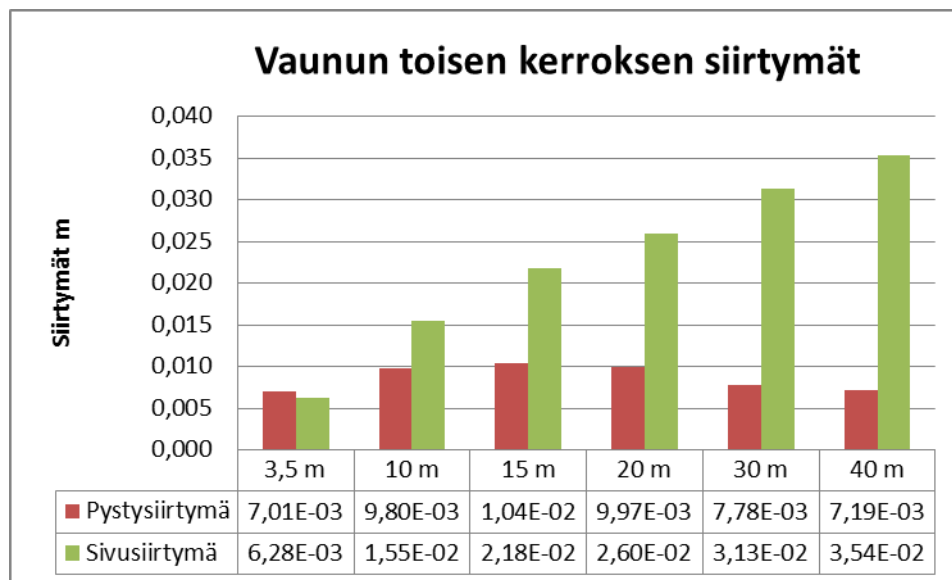


Kuva 61. Vaunun poikittaissuuntaisten maksimikiihtyvyyksien kehittyminen geometriavirheen erilaisilla aallonpituuksilla. Punainen pylväs kuvaa vaunun massakeskipisteen, vihreä ensimmäisen kerroksen telin ja sininen toisen kerroksen telin kohdan kiihtyvyyksiä.

Poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä tarkasteltaessa huomataan kiihtyvyyksien ja kiihtyvyyden muutosnopeuden pienenevän epätasaisuuden aallonpituuden kasvaessa. Erityisesti

alemman kerroksen kiihtyvyydet pienenevät, mikä viittaa epätasaisuuden herättäneen erilaisia ominaisvärähtelymuotoja 10 metrin ja isomman aallonpituuden epätasaisuuksilla. Erilaisten kiihtyvyyksien perusteella vaunu värähtelee 10 metriä pienemmillä aallonpituuksilla yaw -ominaisvärähtelymäisesti, kun taas pidemmän aallonpituuden epätasaisuuksilla toisen kerroksen kiihtyvyydet korostuvat. Näin ollen 10 metriä pidemmällä aallonpituuksilla yaw -ominaisvärähtelymuoto vaihtunee lower center roll -ominaismuotoon. Tämä näkyy myös 3,5 metrin epätasaisuuden kiihtyvyyksien kehityksen kuvaajassa, mikä poikkeaa isompien aallonpituuksien kuvaajista.

Mielenkiintoista on kuitenkin, että 15 ja 20 metrin aallonpituudella saadaan hieman suurempia kiihtyvyyden arvot kuin 10 metrin aallonpituudella, mikä voisi viitata jonkinlaiseen ominaisvärähtelyn voimistavaan vaikutukseen. Erilaiset aallonpituudet vaikuttavat myös siirtymien syntyyn. Kuvassa 62 on esitelty vaunun toisen kerroksen siirtymiä.



Kuva 62. Vaunun toisen kerroksen telin kohdan maksimaaliset poikittais- ja pystysuuntaiset siirtymät epätasaisuuden erilaisilla aallonpituuksilla. Punainen pylväs kuvaa pystysuuntaisia siirtymiä ja vihreä poikittaissuuntaisia siirtymiä. Geometriavirheen amplitudi pysyy kokoajan vakiona.

Vaunun poikittaissuuntaiset siirtymät kasvavat ollen 3,5 metrin aallonpituuden epätasaisuudella maksimissaan 7 mm luokkaa, kun taas 40 metrin aallonpituudella siirtymät kasvavat jopa 35 millimetriin. Aallonpituuden ollessa pidempi kalustolla on enemmän aikaa reagoida geometrian muutokseen, jolloin kalusto ehtii heilahtamaan pidemmälle epätasaisuuden mukaisesti. Kuten aiemmin luvussa 5.4.1 on todettu, myös Iwnickin (Iwnicki 2006) mukaan pitkäaaltoiset epätasaisuudet aikaansaavat kalustossa matkustusmukavuutta huonontavia poikittaissuuntaisia siirtymiä. Pystysuuntaiset siirtymät eivät juuri muutu aallonpituuden kasvaessa, mutta poikittaissuuntaiset siirtymät kasvavat likimain lineaarisesti.

Kiihtyvyyksien ollessa yli 10 metrin aallonpituuden geometriavirheen aiheuttamia, saavuttaa vaunun toisen kerroksen kiihtyvyyssanturi suuremmat poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet kuin alemman kerroksen kiihtyvyyssanturi. Näin ollen erityisesti vaunun toisen kerroksen matkustajat ovat alttiimpia pidemmän aallonpituuden aiheuttamille poikittaissuuntaisille kiihtyvyyksille kuin ensimmäisen kerroksen matkustajat. Pidemmällä 10 ja 15 metrin aallonpituuksilla pystysuuntaiset maksimikiihtyvyydet kasvavat kauttaaltaan 3,5 metrin aallonpituuden kiihtyvyyssarvoja suuremmiksi. Näin ollen kuvitteellinen huono H-luokka saattaa ylittää reilustikin suuremmilla aallonpituuksilla *-luokalle asetetut kiihtyvyyssarja-arvot, jolloin ylityksiä saattaa tapahtua myös alemmilla todellisilla luokilla.

Eri aallonpituuksien epätasaisuuksilla pyrittiin myös tutkimaan vaunun mahdollisesti saavuttamia erilaisia ominaistajuuksia. Geometriavirheen ollessa 10 m, 15 m, 20 m, 30 m tai 40 m ja ajonopeuden 160 km/h malli värähtelee lower center roll -värähtelymuodossa jolloin vaunun toinen kerros saavuttaa alemmaa kerrosta suuremmat kiihtyvyydet, kuten kuvista 59 ja 60 voidaan havaita. 3,5 metrin aallonpituudella, jolla tarkastellaan kierouden poikkeaman sallittuja raja-arvoja, kalusto värähtelee pitch -värähtelymuodossa, jolloin vaunun päällä on keskikohtaa suuremmat kiihtyvyydet. Tällöin kiihtyvyydet eivät merkittävästi eroa ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä ja poikittaissuuntaiset siirtymät eivät ole niin suuria. Vaunun saavuttamat värähtelymuodot riippuvat myös epätasaisuuden tyypistä, jolloin kierous ehkä herkemmin herättää lower center roll värähtelyä. Näin ollen korkeuspoikkeaman kaltainen geometriavirhe voisi herättää herkästi pitch ja bounce -tyyppisiä värähtelymuotoja ja nuolikorkeuspoikkeama mahdollisesti yaw -tyyppisiä värähtelymuotoja.

9. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Työn tavoitteena oli tutkia radan erilaisten epätasaisuuksien ja jäykkyysvaihteluiden vaikutuksia kaksikerroksiselle IC-vaunulle muodostuviin värähtelyihin. Liikenneviraston kunnossapitoluokituksessa (Ratahallintokeskus 2005a) on määritelty radalla ilmenevät erilaiset mittauksin seurattavat epätasaisuudet sekä kunnossapitotason mukaiset raja-arvot näille poikkeamille. Radan jäykkyys herättää junakalustossa hyvin samankaltaisia värähtelyjä, kuin mallinnetut epätasaisuudet. Näin ollen junan liikkeen mallintaminen on suoritettu vain radan geometriaa muokkaamalla. Koska mallin epätasaisuuden ja jäykkyysmuutoksien aiheuttamat kiihtyvyyksikuvaajat vastaavat toisiaan, ovat mallilla epätasaisuuksilla saadut kiihtyvyyden arvot rinnastettavissa jäykkyysmuutoksilla saataviin.

9.1 Kalustomallin rakennus ja ominaismuotoanalyysi

Kalustoon muodostuvia erityyppisiä värähtelyjä tutkittiin Vampire pro -ohjelmassa rakennetun mallin avulla. Malli rakennettiin vaunun valmistajalta saatujen parametritietojen mukaan muutamine yksinkertaistuksineen. Mallin vastaavuutta todelliseen vaunuun tutkittiin suorittamalla ominaismuotoanalyysi kaksikerroksiselle IC-vaunulle. Eritaajuisien herätteiden avulla vaunu saatiin värähtelemään ominaismuodoissaan, jolloin ominaismuodolle saatuja taajuuksia voitiin verrata mallista saatuihin tuloksiin ja varmistaa niiden samankaltaisuus. Todellisen vaunun ominaismuotojen todettiin vastaavan kohtalaisen hyvin mallista saatuja ominaismuotoja, jolloin mallin kiihtyvyyksiä voidaan pitää vähintäänkin suuntaa antavina. Kuitenkaan varsinaista mallin verifiointia ei suoritettu tämän työn puitteissa. Mallin muuta toimivuutta tarkasteltiin ohjelman omien tarkastelujen avulla.

Kiihtyvyyssimulointeja varten malliin määritettiin kolme paikkaa kiihtyvyyssantureille. Ensimmäinen sijoitettiin vaunun massakeskipisteeseen ja toinen vaunun massakeskipisteen korkeudelle, mutta taaimmaisen telin kohdalle. Koska vaunu on kaksikerroksinen ja erityisesti toisen kerroksen matkustajan kokemat kiihtyvyydet ovat kiinnostavia, määritettiin kolmas kiihtyvyyssanturi taaimmaisen telin kohdalle toiseen kerrokseen korkeudelle, jossa matkustajan pää voisi sijaita. Kiihtyvyyssantureiden sijaintien ansiosta esimerkiksi mahdollisesti vaunussa heräävän ominaismuodon määrittäminen on helpompaa.

9.2 Radan epätasaisuudet ja niiden simulointi

Radan erilaisia epätasaisuuksia ja jäykkyysvaihteluita ja niiden syitä tutkittiin kirjallisuustutkimuksena. Kalustosta rataa johtuvat dynaamiset kuormitukset aiheuttavat herkästi kiskovikoja, jotka lisäävät kaluston tärinää. Raja-arvoihin perustuvat pidemmän aal-

lonpituuden poikkeamat johtuvat kuitenkin usein kiskojen alla tapahtuvista muodonmuutoksista. Tällöin radan rakenneosien jäykkyys on merkittävässä roolissa. Radan kokonaisjäykkyyteen ja näin ollen epätasaisuuksien muodostumiseen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat pohjamaan jäykkyys ja sen vaihtelu, sekä ratapölkyn alle muodostuva tyhjä tila. Ne myös kasvattavat rataa muodostuvia dynaamisia kuormituksia.

Vaunun värähtelyn simulointia varten valittiin kolme tarkasteltavaa geometriavirhettä eli kierouden (3,5 m), korkeuspoikkeaman (5 m) ja nuolikorkeuspoikkeaman (20 m), jotka oli tarkasti määritelty ja joille Liikennevirasto (Ratahallintokeskus 2005a) on asettanut selkeät raja-arvot kunnossapitoluokituksessaan. Nuolikorkeuspoikkeama valittiin puhtaaksi poikittaissuuntaiseksi epätasaisuudeksi poikittaissuuntaisten kiihtyvyyksien kehittymisten tutkimista varten. Korkeuspoikkeama oli puhtaasti pystysuuntainen epätasaisuus, jonka avulla kyettiin tarkastelemaan erityisesti pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä ja se on lisäksi kohtuullisen yleinen radan jäykkyydestä johtuva epätasaisuus. Näiden lisäksi valittiin radan kierous, jossa vain toinen kisko taipuu alaspäin aiheuttaen kalustolle sekä poikittais-, että pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä kuten moni epätasaisuus todellisuudessaakin aiheuttaa. Epätasaisuudet toteutettiin sinikäyrän muotoisina, jotta ne vastaisivat mahdollisimman hyvin todellista geometriavirhettä.

Epätasaisuudet toteutettiin pääasiassa Liikenneviraston luokituksen mukaan. Tarkasteltavaksi valittiin D-luokka ja *-luokka. Näiden lisäksi valittiin tarkasteltavaksi epätasaisuuksien suhteen vielä luokituksen ulkopuolinen pahempi tilanne, joka nimettiin H-luokaksi. D-luokan epätasaisuuksien aiheuttamien pysty- ja poikittaissuuntaisen kiihtyvyyden raja-arvo on Liikenneviraston määräysten mukaan $1,5 \text{ m/s}^2$ ja *-luokan raja-arvo on $2,5 \text{ m/s}^2$. H-luokalla käytettiin kiihtyvyyksien osalta *-luokan raja-arvoa eli $2,5 \text{ m/s}^2$.

Geometriavirheiden aiheuttamien kiihtyvyyksien lisäksi tutkittiin poikkeaman aallonpituuksien vaikutusta vaunun kiihtyvyyksiin ja mahdollisesti herääviä erilaisia ominaismuotoja. Ominaismuodon herääminen voi kasvattaa vaunussa syntyviä kiihtyvyyksiä. Aallonpituuden vaikutusten tarkastelu suoritettiin kierouden avulla, jotta voitaisiin tarkastella sekä pysty- että poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä. Aallonpituuksiksi valittiin 3,5m 10m, 15m, 20m, 30m ja 40 metriä.

9.3 Simulointitulokset

Simuloinneissa muutettiin tutkittavien epätasaisuuksien suuruutta eri nopeuksilla sekä aallonpituutta nopeuden ja epätasaisuuden suuruuden ollessa vakio. Tuloksien yleisenä piirteenä voidaan todeta, että nopeuden kasvaessa saadut kiihtyvyydetkin pääasiassa kasvavat, vaikka sallitun poikkeaman suuruus pienenee. Raja-arvojen ylityksiä tapahtui korkeuspoikkeaman tapauksessa pystysuuntaisilla kiihtyvyyksillä kaikissa luokissa, sekä kierouden tapauksessa pystysuuntaisilla kiihtyvyyksillä H- ja D-luokissa. Nuolikorkeuspoikkeaman aiheuttamat kiihtyvyydet eivät ylittäneet raja-arvoja.

Nuolikorkeuspoikkeama aiheuttaa lähinnä poikittaissuuntaisia kiihtyvyyksiä, jotka jäävät kuitenkin myös H-luokassa raja-arvojen alle. Suurin saavutettu vaunun kiihtyvyys on H-luokassa 200 km/h toisen kerroksen poikittaissuuntainen kiihtyvyys telin kohdalla $1,158 \text{ m/s}^2$. Vaunun yläosassa saavutetaan suurimmat kiihtyvyydet ja vaunu näyttää värähtelävän lower center roll -ominaisvärähtelyllä. Pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä ei juuri muodostunut.

Korkeuspoikkeama aiheutti vaunulle kaikissa luokissa pystysuuntaisten kiihtyvyyksien raja-arvojen ylittymistä, ollen näin selvästi ongelmallinen kaksikerroksiselle vaunulle. Suurimmat kiihtyvyyden arvot saatiin kuvitteellisessa H-luokassa 200 km/h nopeudessa, jolloin kiihtyvyyden arvo oli telin kohdalla vaunun toisessa kerroksessa $6,651 \text{ m/s}^2$ ja ensimmäisessä kerroksessa $6,65 \text{ m/s}^2$. Telin kohdalla vaunun ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa saatiin D-luokassa kiihtyvyyksiksi $1,593 \text{ m/s}^2$ ja *-luokassa $3,284 \text{ m/s}^2$. *- ja D-luokassa raja-arvot ylittyivät 160 km/h ja 200 km/h nopeuksilla, kun H-luokassa raja-arvot ylittyivät kaikilla nopeuksilla. Vaunu saavuttaa merkittäviä pystysuuntaisia siirtymiä saaden *-luokassa jopa yli 8 mm ja H-luokassa jopa 11 mm poikkeaman. Tämä kuitenkin johtuu epätasaisuuden suuruudesta, eikä vaunun värähtelystä. Korkeuspoikkeamien seurauksena vaunu värähtelee todennäköisesti pitch -ominaisvärähtelyllä, sillä vaunu saavuttaa telin kohdalta vaunun keskikohtaa suuremmat kiihtyvyydet.

Kierouden aiheuttamat pystysuuntaiset kiihtyvyydet ylittävät annetut raja-arvot H- ja D-luokassa. Poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet eivät ylitä raja-arvoja. H-luokassa kaikissa nopeuksissa saavutettavat pystysuuntaiset kiihtyvyydet ylittävät asetetun raja-arvon ja ovat muutenkin hyvin lähellä toisiaan. Suurimmat arvot saavutetaan H-luokan 160 km/h nopeudessa taaimmaisen telin kohdalta ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa, jossa kiihtyvyydet ovat yhtenevät eli $2,968 \text{ m/s}^2$. D-luokassa vain 160 km/h ($1,602 \text{ m/s}^2$) ja 200 km/h ($1,765 \text{ m/s}^2$) nopeudessa vaunu saavuttaa raja-arvot ylittäviä kiihtyvyyksiä. Suurin poikittaissuuntainen kiihtyvyys saavutetaan H-luokassa ($2,256 \text{ m/s}^2$) ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla 160 km/h nopeudessa, mutta lähimpänä raja-arvojen ylitystä ollaan D-luokassa, jossa ensimmäisessä kerroksessa telin kohdalla 160 km/h nopeudessa saavutetaan kiihtyvyys $1,378 \text{ m/s}^2$. Kuvaajista päätellen kaluston värähtelyn tyyppi vaihtelee ajetun nopeuden mukaan.

Kun tarkastellaan kierouden eri aallonpituuksien vaikutusta vaunun kaikkiin kiihtyvyyksiin, huomataan heti maksimikiihtyvyyksien pääsääntöisesti pienenevän aallonpituuden kasvaessa. Tämä on loogista, kun kalustolla on nyt enemmän aikaa mukautua vastaan tulevaan epätasaisuuteen. Kuitenkin pystysuuntaiset maksimikiihtyvyydet ovat suurimmillaan aallonpituuden ollessa 10 m, mikä johtuu heränneestä lower center roll -ominaismuodosta. Myös poikittaissuuntaiset kiihtyvyydet pienenevät jonkun verran, mutta eivät niin selkeästi pidempiin aallonpituuksiin siirryttäessä. Sen sijaan aallonpituuden kasvaessa 3,5 metristä 10 metriin muuttuu vaunun värähtelymuoto selvästi yaw -ominaismuodosta lower center roll -ominaismuotoon, jolloin toisen kerroksen kiihtyvyydet ovat suu-

rempia kuin ensimmäisessä kerroksessa. Myös vaunun poikittaissuuntaiset siirtymät kasvavat lähestulkoon lineaarisesti epätasaisuuden aallonpituuden kasvaessa, kun taas pystysuuntaiset siirtymät pysyvät samansuuruisina aallonpituudesta riippumatta.

Epätasaisuuden aallonpituudella on suuri merkitys aiheutuviin kiihtyvyyksiin. Kaksikerroksisen vaunun pystysuorat kiihtyvyydet kasvavat kuvitteellisella H-luokalla reilusti raja-arvoja korkeammiksi kierouden aallonpituuden kasvaessa, jolloin myös todellisissa luokissa raja-arvojen ylityksiä voi tapahtua. Näin ollen korjaustoimenpiteiltä mahdollisesti säästyvä pidemmän aallonpituuden kierous saattaa aiheuttaa vaunulle suurempia kiihtyvyyksiä kuin tavallinen määriteltä 3,5 metrin aallonpituudella esiintyvä kierous. Pidemmällä aallonpituuksilla myös vaunun toisen kerroksen kiihtyvyydet näyttävät kasvavan huomattavasti ensimmäisen kerroksen kiihtyvyyksiä suuremmaksi, jolloin pidemmän aallonpituuden epätasaisuudet ovat kaksikerroksiselle vaunulle erityisen hankalia. Koska vaunun poikittaissuuntaiset siirtymät kasvavat myös aallonpituuden kasvaessa, on toisessa kerroksessa matkustavalla riski altistua pidemmän aallonpituuden aiheuttamaan hitaaseen, mutta suureen siirtymään poikittaissuunnassa. Tämä voi tuntua matkustettaessa laivamaisena keinuntana.

9.4 Jatkotutkimus

Yksi tämän työn tavoitteista oli rakentaa kaksikerroksisesta IC-vaunusta toimiva malli Vampire pro -ohjelmaan. Malli on nyt rakennettu ja sen avulla on mahdollista saada muun muassa tietoa kaluston kiihtyvyyksistä ja siirtymistä erilaisilla radoilla. Vaunusta saatavat ominaisvärähtelyn arvot vastasivat kohtuullisen hyvin mittauksissa saatuja arvoja, mutta telin osalta vastaavuudessa on vielä parannettavaa. Kuitenkin toisen kerroksen matkustajan kokemien kiihtyvyyksien selvittämiseen mallin oletetaan olevan riittävän tarkka. Mallin varsinainen verifiointi suoritetaan projektin myöhemmässä vaiheessa. Tämän lisäksi erilaisten epätasaisuuksien todellisia vaikutuksia kaksikerroksiseen vaunuun voitaisiin selvittää kiihtyvyyksien mittausten avulla epätasaisuuksiltaan tunnetulla rataosuudella, jotta mittaus- ja simulointituloksia voitaisiin verrata. Vertailun avulla mallin toiminta saataisiin entistä luotettavammaksi.

Jatkotutkimusta ajatellen olisi mielenkiintoista selvittää myös muiden epätasaisuuksien kuin kierouden vaikutuksia erimittaisilla aallonpituuksilla. Näin voitaisiin selvittää, minkä aallonpituuden epätasaisuudet ja epätasaisuustyypit ovat huonoimmat ajatellen kaksikerroksisen vaunun saamia kiihtyvyyksiä. Kaksikerroksinen vaunu poikkeaa toisen kerroksensa takia suuresti muista radalla liikkuvasta kalustosta, joten sille ongelmalliset geometrian epätasaisuudet eivät välttämättä haittaa muuta kalustoa. Näiden epätasaisuuksien selvittäminen voi olla tärkeässä asemassa, jos vaunun toisen kerroksen matkustajat alkavat kokea liian kovia kiihtyvyyksiä tai edestakaista heiluntaa, mikä voi aiheuttaa huonoa oloa matkustettaessa.

LÄHTEET

Berggren, E. (2009). Railway Track Stiffness, Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. PhD Thesis. Stockholm 2009. Royal Institute of Technology (KTH), Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Rail Vehicles. 123 p.

Chaar, N. & Berg, M. (2007). Simulation of vehicle-track interaction with flexible wheel-sets, moving track models and field tests. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. pp. 921-931

Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*. Second Edition. MRT-Productions, The Netherlands. 654 p.

Grassie, S. L. (1989). Resilient Railpads: Their Dynamic Behaviour in the Laboratory and on Track. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. January 1989 vol. 203 no. 1 pp. 25-32.

Hakulinen, P., Korkeamäki, S., & Nurmikolu, A. (2012). Katsaus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksen perusteisiin. *Julkaisematon raportti*.

Hu, H. & Brinkman, H. (2013). Key Factors of Subgrade Influence Dynamic Wheel/Rail Loads at Railway Transition Zones. *IACGE 2013: Challenges and Recent Advances in Geotechnical and Seismic Research and Practices*. pp. 96-104

Heinonen, T-R. (2012). Lumen irtoaminen junakalustosta raiteen epäjatkuvuuskohdissa. *Diplomityö*. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 115 s.

Hämeen Sanomat. (2007). Elli ja Emma etsivät viat rataverkosta. [WWW] [Viitattu 17.12.2015] Saatavilla: <http://www.hameensanomat.fi/uutiset/kotimaa/154336-elli-ja-emma-etsivat-viat-rataverkosta>

Iwnicki, S. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. London. Chemical Rubber Company (CRC) Press, pp. 279-325.

Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Nurmikolu, A. (2014). Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 55/2014. 174 s.

Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. *Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011*. s. 152.

Kauppinen, M. (2011). Ratakiskon elinkaari. *Diplomityö*. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011

- Korkeamäki, S. (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuoro-vaikutuksessa. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 04/2011. 93 s.
- Lahti, P. (2008). Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella. Helsinki. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 12/2008. 90 s. + liitt. 22 s.
- Lichtberger, B. (2005). Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Germany. Eurailpress. 634 p.
- Liikennevirasto. (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2. Radan geometria. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 3/2010 161 s.
- Liikennevirasto. (2013). Rataverkon kuvaus 1.1.2014. Liikenneviraston väylätietoja 5/2013. 72 s.
- Liikennevirasto. (2014). Suomen rautatietilasto 2014. Helsinki. Liikenneviraston tilastoja 2/2014. 51 s.
- Lundqvist, A. & Dahlberg, T. (2005). Load impact on railway track due to unsupported sleepers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. vol 219 no. 2 pp. 67-77.
- Lyon, D. (1972). The calculation of track forces due to dipped rail joints, wheel flats and rail welds (abstract). British Railways Board Research and Development Division Technical Report, TM.TS0-2, 1972. 1 p.
- Miettinen, J. (2015). Tutkimusraportti. Junavaunun moodianalyysi 9.-10.6.2015. Tampere University of Technology.
- Nielsen, J. C. O. & Igeland, A. (1995). Vertical dynamic interaction between train and track influence of wheel and track imperfections. Journal of Sound and Vibration. vol 187, issue 5, November 1995. pp. 825-839.
- Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Helsinki, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. 193 s.
- Nurmikolu, A. (2015). Johdanto rautatiesektoriin: Toimijat, markkinat, rataverkko ja radanpito. Luentokalvot kurssilla RAK-23310 Rautatietekniikka. Tampereen Teknillinen yliopisto, Moodle2-alusta. [WWW] [Viitattu 17.12.2015] Rajattu saatavuus.
- Okamoto, I., edited by Wako, K. (1998). Railway Technology Today 5. How Bogies Work. Japan Railway & Transport Review 18, December 1998. pp. 52-61

Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. (2015). Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 23/2015. 132 s + liitt. 10 s.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. (2013). Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. 190 s. + liitt. 12 s.

Rail Corporation New South Wales (RailCorp). (2009). Engineering Manual - Track. Rail Defect Handbook: Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control. 82 p.

Ratahallintokeskus. (1995). Ratatekniset ohjeet (RAMO), osa 1 Yleiset perusteet. Helsinki. 8 s.

Ratahallintokeskus. (2000). Ratatekniset ohjeet (RAMO), osa 15 Radan kunnossapito. Helsinki. 63 s.

Ratahallintokeskus. (2002). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 11 Radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.

Ratahallintokeskus. (2004) Standardin SFS-EN 13450 Raideseapelikiviaineekset, kansallinen soveltamisohje. Helsinki. 7 s

Ratahallintokeskus. (2005a). Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. 2005-01. 22 s. + liitt. 4 s.

Ratahallintokeskus. (2005b). Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet (jtt). Helsinki. 146 s.

Ratahallintokeskus. (2006). Ratatekniset ohjeet (RAMO), osa 13 Radan tarkastus. Helsinki. 51 s. + liitt. 28 s.

Ratahallintokeskus. (2008). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3 Radan rakenne. Helsinki. 50 s. + liitt. 37 s.

Resiina. (2015). InterCity2-vaunut. Verkkolehti. [WWW] [Viitattu 21.12.2015] Saatavilla: <http://www.resiinalehti.fi/artikkeli/73%20http://www.transtech.fi/kiskokalusto/matkustajavaunu>

Salmi, T. & Virtanen, S. (2006). Dynamiikka. Tampere. Pressus Oy. 480 s.

Salmi, T. & Pajunen, S. (2010). Lujuusoppi. Tampere. Pressus Oy. 459 s.

Sawley, K., Urban, K. & Walker, R. (2005). The Effect of Hollow-worn wheels on vehicle stability in straight track. Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel System. Volume 258, Issues 7-8, March 2005. pp. 1100-1108.

Selig, E. T. & Li, D. (1994). Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It. Transportation Research Record. No. 1470, Railroad Research Issues. pp. 47-54.

SFS-EN 13848-1. (2008). Kiskoliikenne. Rata. Ratageometrian laatu. Osa 1: Ratageometrian kuvaus = Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 1: Characterisation of track geometry. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 19 s. + liitt. 6 s.

SFS-EN 13674-1 + A1. (2008). Kiskoliikenne. Rata. Kiskot. Osa 1: 46 kg/m ja enemmän painavat vignole-kiskot = Railway applications. Track. Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. Helsinki. 107 s.

SFS-EN 13848-5 + A1. (2010). Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 5: Geometric quality levels. Plain line. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 15 p. + 7 app.

Shi, J., Chan, A. H. & Burrow, M. P. N. (2013). Influence of unsupported sleepers on the dynamic response of heavy haul railway embankment. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. pp. 657-667.

Solanki, D. (2013). Bogie under frame. Presentation on fabrication of Bogie under frame used in Locomotive. SlideShare. [WWW] [Viitattu 17.12.2015] Saatavilla: <http://www.slideshare.net/deepu1711/bogie-under-frame>

Taimela, R. (2011). Raidegeometrian suunnittelu. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2011. 161 s.

Tanabe, N., Hirota, Y., Omichii, T., Hiramata, J. & Nagase, K. (2004). Study on the Factors Which Cause the Wheel Skidding of JR Ltd. Express EMUs*. JSME International Journal. Series C, Vol 47, No. 2. pp 488-495

Trafi. (2011). Rautatiejärjestelmän infrastruktuuriosajärjestelmä. Määräys TRAFI/18888/03.04.02/2011. 64 s. + liitt. 25 s.

Trafi. (2014). Veturit ja henkilöliikenteen liikkuva kalusto. Määräys TRAFI/4690/03.04.02.00/2014. 4 s.

Transtech. (2015). Kiskokalusto. [WWW] [Viitattu 21.12.2015] Saatavilla: <http://www.transtech.fi/kiskokalusto/matkustajavaunu>

Tunna, J., Sinclair, J. & Perez, J. (2007). A Review of wheel and rolling contact fatigue. Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. vol. 221 no. 2. pp. 271-289.

UIC. (2002). Leaflet 712. Rail Defects, 4th ed. International Union of Railways. 111 p.

Vampire Pro. (2015). Airspring Modeling advanced tutorial. Rajattu saatavuus. [WWW]
[Viitattu 17.7.2015]

VR Track. (2015). Radantarkastuspalvelut huipputason asiantuntemuksella. [WWW]
[Viitattu 17.12.2015] Saatavilla: <http://www.vrtrack.fi/fi/vr-track/arviointi-ja-hyv%C3%A4ksyntapalvelut/radantarkastuspalvelut/>

Wickens, A. H. (2003). Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics. Guidance and Stability. Loughborough University, UK. 286 p.

Williams, B. A., Dersch, M. S., Edwards, J. R. & Barkan, C. P. L. (2014). Quantification of Lateral Forces in Concrete Crosstie Fastening Systems. Manuscript for Annual Meeting Compendium of Papers. TRB 15-1534. Transportation Research Board 94th Annual Meeting.

Wu, T. X. & Thompson, D. J. (1999). The effects of local preload on the foundations stiffness and vertical vibration of railway track. Journal of Sound and Vibration. Volume 219, Issue 5. pp. 881-904.